

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA  
INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA LA  
MEDICIÓN DE LA TASA DE INYECCIÓN  
DIÉSEL**

POR

ING. MAYRA LIZBETH BUSTOS BRITO

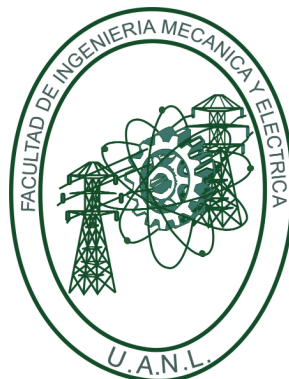
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

MAYO 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA  
INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA LA  
MEDICIÓN DE LA TASA DE INYECCIÓN  
DIÉSEL**

POR

ING. MAYRA LIZBETH BUSTOS BRITO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

MAYO 2019

# Universidad Autónoma de Nuevo León

## Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

### Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «*Puesta en operación de una instalación experimental para la medición de la tasa de inyección*», realizada por la alumna Mayra Lizbeth Bustos Brito, con número de matrícula 1887245, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis



---

Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León

Asesor



---

Dr. Simón Martínez Martínez

Co-Asesor



---

Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo

Revisor



---

M.C. Miguel García Yera

Revisor

Vo. Bo.



---

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, mayo 2019

# AGRADECIMIENTOS

---

“Todo tiene su tiempo y todo lo que se quiere debajo del cielo tiene su hora”. Gracias a Dios, por cumplir este anhelo de mi corazón, por darme las fuerzas necesarias para seguir adelante con este proyecto y llenarme de esperanza cuando todo tornaba mal.

A mi papi, George Bustos por ser mi apoyo en la distancia, por ser tan bueno conmigo, por todo tu amor. Por que confiaste en mi, gracias por todas tus palabras de animo y por recibirme en casa siempre con los brazos abiertos. A mi mami, Maricela Brito por todas tus oraciones, por ser mi mejor amiga, por darme palabras de aliento, porque siempre estas al pendiente de tu familia y porque así como mi papi, tu también creíste en mi. A mis hermanos Marian y Jorgito, gracias por quererme tanto, por sus oraciones y por sus palabras de apoyo en todo momento. A mi abuelita Julia por sus oraciones, sus consejos y por enseñare siempre a confiar en Dios. A mi abuelito Paulino gracias por su amor y por todos su apoyo en este tiempo.

A mi novio, mejor amigo y compañero Carlos Tobías. Por ser mi apoyo incondicional, por estar conmigo en los momentos más dulces pero también por ser fuerte y decirme las palabras correctas en los momentos difíciles, gracias por todas las historias que hemos construido.

A mis compañeros de generación por ayudarme y por las buenas historias juntos, Adriana, Christian Hernandez, Cristian Ramirez, Eder y Damian.

A mis compañeros de las diferentes generaciones por su amistad, Lis, Sory,

Cecy, Rossio, Vane, Guille, Vic, Nibardo, Sergio, Fong, Ricardo, Yona, Fer, Ulises y Alan. A Yossli, por las historias compartidas y por ser tan compresiva conmigo en los tiempos difíciles.

AL Dr. Santos Méndez y al Maestro Miguel García, por su apoyo técnico, por su tiempo y por las enseñanzas. Al Dr. Fausto Sánchez Cruz, coordinador de la maestría, por permitirme continuar con mis estudios, al Dr. Simón Martínez Martínez, Subdirector de Estudios de Posgrado, por su apoyo, ayuda técnica, enseñanzas y por establecer las bases de mi tesis. Al Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León por su apoyo a la realización de esta tesis.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por el apoyo brindado a lo largo de este programa académico. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) del Gobierno de México, por la financiación de mis estudios de maestría (beca 620622), y por apoyar esta investigación a través del proyecto: CB-239943 y del LaNDACBio (proyecto: 293981). Gracias también a la Fundación DENSO Norteamérica (proyecto: *Impact of multiple-injection strategies on the injection process in a diésel common-rail system*) por ayudar esta investigación.

*Al regalo más bello que Dios me ha dado:*

*Mi familia.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Nomenclatura</b>	<b>xvi</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	4
<b>2. Estado actual del proceso de inyección</b>	<b>7</b>
2.1. Proceso de inyección . . . . .	8
2.1.1. Sistema de inyección diésel . . . . .	8
2.1.2. Tipos de sistema de inyección directa . . . . .	10
2.1.3. Sistema de inyección diésel common-rail . . . . .	11
2.2. Fundamentos de la tasa de inyección diésel . . . . .	15
2.2.1. Tasa de inyección diésel. . . . .	15
2.2.2. Principio de funcionamiento. . . . .	16
2.2.3. Efecto de los parámetros de inyección sobre la tasa de inyección	20

---

2.2.4. Efecto de las propiedades físicas de los combustibles sobre la tasa de inyección . . . . .	21
2.3. Flujo interno en las toberas diésel. . . . .	23
2.3.1. Geometría en la tobera diésel. . . . .	23
2.3.2. Velocidad y área efectiva . . . . .	25
2.3.3. Coeficiente de descarga . . . . .	26
2.4. Chorro diésel . . . . .	29
2.4.1. Proceso de atomización . . . . .	29
2.4.2. Regímenes de atomización . . . . .	29
2.5. Parámetros macroscópicos del chorro diésel . . . . .	31
2.5.1. Parámetros macroscópicos . . . . .	31
2.5.2. Parámetros microscópicos . . . . .	33
2.6. Estrategias de inyección múltiple . . . . .	35
2.6.1. Tasa de inyección bajo una estrategia de inyección piloto. . . .	37
2.6.2. Tasa de inyección bajo una estrategia de inyección partida . .	38
<b>3. Planteamiento de la tesis</b>	<b>40</b>
3.1. Síntesis de la revisión bibliográfica . . . . .	41
3.2. Hipótesis . . . . .	42
3.3. Objetivos . . . . .	42
3.3.1. Objetivo general . . . . .	42



3.3.2. Objetivo específico . . . . .	43
3.4. Metodología general de la tesis . . . . .	43
<b>4. Herramientas experimentales</b>	<b>46</b>
4.1. Instalaciones experimentales . . . . .	47
4.1.1. Banco de pruebas . . . . .	47
4.1.2. Sistema de inyección diésel common-rail . . . . .	48
4.1.3. tasímetro tipo n . . . . .	49
4.1.4. Sistema de presurización de nitrógeno . . . . .	50
4.1.5. Unidad Electrónica del tasímetro . . . . .	51
4.1.6. Circuito de control para inyectores diésel solenoide . . . . .	52
4.1.7. Software del analizador de inyección . . . . .	53
<b>5. Puesta en operación y validación de la instalación experimental</b>	<b>54</b>
5.1. Puesta en operación de la instalación experimental . . . . .	55
5.1.1. Protocolo de encendido . . . . .	55
5.1.2. Instalación del Software analizador de inyección . . . . .	56
5.1.3. Llenado de combustible . . . . .	59
5.1.4. Calibración . . . . .	60
5.1.5. Interfaz del Software analizador de inyección . . . . .	62
5.1.6. Configuración para estrategias de inyección simple y múltiple.	67
5.2. Validación de la instalación experimental . . . . .	72

5.2.1. Diseño de la matriz de experimentos bajo la estrategia de inyección simple . . . . .	72
5.2.2. Tratamiento de los ensayos de tasa de inyección bajo una estrategia de inyección simple . . . . .	73
5.2.3. Diseño de la matriz de ensayos para la estrategia de inyección partida . . . . .	78
5.2.4. Tratamiento de los ensayos de tasa de inyección bajo una estrategia de inyección partida . . . . .	79
5.3. Conclusiones . . . . .	84
<b>6. Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>85</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	86
6.2. Trabajos futuros . . . . .	87
<b>Referencias</b>	<b>89</b>
<b>A. Mantenimiento</b>	<b>97</b>
A.1. Objetivo . . . . .	98
A.2. Metodología . . . . .	98
A.2.1. Tasímetro . . . . .	98
A.2.2. Unidad Electrónica . . . . .	99

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Evolución histórica de la norma EURO. . . . .	3
2.1. Sistema de inyección diésel common-rail. . . . .	12
2.2. Esquema de un inyector diésel solenoide. . . . .	13
2.3. Funcionamiento de un inyector diésel solenoide. . . . .	14
2.4. Determinación del inicio de inyección a partir de la medida de tasa de inyección. . . . .	16
2.5. Método Bosch. . . . .	17
2.6. Efecto de la presión de inyección y tiempo de energización, sobre la tasa de inyección. . . . .	20
2.7. Tasa de inyección con una $P_{rail}$ de 160 MPa, una $P_{back}$ de 5 MPa, y tiempos de energización de 500, 1000 y 2000 ms. . . . .	22
2.8. Tasa de inyección constante de 1 mg, obtenida a una $P_{rail}$ de 30 MPa y una $P_{back}$ de 5 MPa. . . . .	23
2.9. Especificaciones de la geometría de una tobera diésel tipo VCO y una microsaco. . . . .	24

2.10. Parámetros más importantes de un orificio de descarga de una tobera diésel. . . . .	24
2.11. Representación del área y velocidad efectiva. . . . .	25
2.12. Coeficiente de descarga en función del número de Reynolds. . . . .	28
2.13. Regímenes de atomización. . . . .	30
2.14. Parámetros macroscópicos del chorro diésel. . . . .	32
2.15. Estrategias de inyección múltiple: a) estrategia de inyección piloto, b) estrategia de post-inyección, y c) estrategia de inyección partida. . . . .	35
2.16. Parámetros de la estrategia de inyección múltiple, representados en una estrategia de inyección partida. . . . .	36
2.17. Perfil de tasa de inyección para DPRF58 y PRF25, con una $P_{rail}$ de 80 MPa y dwell time de 100, 400 y 1200 ms . . . . .	37
2.18. Tasa de inyección bajo una estrategia de inyección partida, con una $P_{rail}$ de 35 MPa, $P_{back}$ de 1 MPa . . . . .	39
4.1. Banco de pruebas . . . . .	47
4.2. Esquema de inyección diésel common-rail. . . . .	48
4.3. Tasímetro tipo N. . . . .	49
4.4. Componentes de la unidad electrónica. . . . .	51
4.5. Señal 1/T y trigger. . . . .	53
5.1. Encendido de la unidad electrónica. . . . .	56
5.2. Información contenida en el dispositivo USB. . . . .	57

5.3. Dirección de la instalación. . . . .	57
5.4. Ajuste óptimo del regulador. . . . .	60
5.5. Calibración óptima del tasímetro. . . . .	61
5.6. Configuración de la opción <i>Measurement</i> . . . . .	67
5.7. Configuración de la opción <i>Fluid</i> . . . . .	68
5.8. Configuración de la opción <i>Function</i> . . . . .	69
5.9. Configuración de la opción <i>Application</i> . . . . .	69
5.10. Configuración de la opción <i>Storage</i> . . . . .	70
5.11. Configuración de la opción <i>Conditioning</i> . . . . .	70
5.12. Configuración de la opción <i>Presetting</i> . . . . .	71
5.13. Configuración de la opción <i>Device</i> . . . . .	71
5.14. Evolución de la tasa de inyección, bajo una estrategia de inyección simple, obtenida a un tiempo de energización de 1 ms, a una $P_{back}$ de 1 MPa, y una $P_{rail}$ de 100 MPa. . . . .	74
5.15. Medición manual de la masa inyectada correspondiente al caso 1. . .	75
5.16. Evolución de la tasa de inyección, bajo una estrategia de inyección simple, obtenida a un tiempo de energización de 1.5 ms, a una $P_{back}$ de 1 MPa, y una $P_{rail}$ de 100 MPa. . . . .	76
5.17. Evolución de la tasa de inyección, bajo una estrategia de inyección partida, obtenida a una $P_{rail}$ 100 MPa, $P_{back}$ 1 MPa, tiempo de energización 1 ms y Dwell time de 1 ms. . . . .	80

5.18. Evolución de tasa de inyección, bajo una estrategia de inyección parti- da, obtenida a una $P_{rail}$ 100 MPa, $P_{back}$ 1 MPa, tiempo de energización 2 ms y Dwell time de 1 ms. . . . .	82
--	----

# ÍNDICE DE TABLAS

---

4.1. Sistema de inyección diésel common-rail. . . . .	49
4.2. Componentes de la unidad electrónica . . . . .	51
5.1. Usuario y contraseñas del Software analizador de inyección. . . . .	58
5.2. Parámetros de la tasa de inyección. . . . .	72
5.3. Matriz de ensayos bajo la estrategia de inyección simple. . . . .	73
5.4. Parámetros de inyección para el caso 1. . . . .	75
5.5. Parámetros de inyección para el caso 2. . . . .	76
5.6. Coeficiente de descarga para el caso 1 y 2. . . . .	78
5.7. Condiciones de operación bajo una estrategia de inyección partida. . .	79
5.8. Parámetros de inyección para el caso 3. . . . .	81
5.9. Coeficiente de descarga para el caso 3. . . . .	81
5.10. Parámetros de inyección para el caso 4. . . . .	83
5.11. Coeficiente de descarga para el caso 4. . . . .	83

# NOMENCLATURA

---

## Siglas

- $ECU$  — Unidad de control eléctrica (*Electronic Control Unit*).  
 $EGR$  — Recirculación de gases de escape (*Exhaust Gas Recirculation*).  
 $EU$  — Unidad electrónica (*Electronic Unit*).  
 $DFP$  — Filtro diésel de partículas (*Diesel Particulate Filter*).  
 $IAV$  — Empresa de ingeniería automotriz (Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr).  
 $SCR$  — Catalizador de reducción selectiva (*Selective Catalytic Reduction*).

## Latinos

- $a$  — Velocidad del sonido del combustible [m/s].  
 $C_d$  — Coeficiente de descarga.  
 $\dot{m}$  — Flujo másico [gr/ms].  
 $\dot{m}_{teo}$  — Flujo másico teórico [gr/ms].  
 $P_{rail}$  — Presión de inyección [bar].  
 $P_{back}$  — Presión al interior del tasímetro [bar].  
 $u_{ef}$  — Velocidad efectiva [ms].  
 $U_{th}$  — Velocidad teórica [ms].



**Letras griegas**

$\Delta P$  — Diferencia de presión,  $(P_{rail}-P_{back})$  .

$\mu_f$  — Viscosidad dinámica del combustible [ $m^3/kg$ ].

$\rho_f$  — Densidad del combustible [ $kg/m^3$ ].

# RESUMEN

---

La formación de la mezcla aire-combustible en los motores Diesel, es uno de los procesos que tiene mayor efecto sobre las emisiones contaminantes. En respuesta a este panorama, se han buscado tecnologías basadas en el proceso de inyección, como es el análisis de la tasa de inyección, la cual influye directamente en los parámetros macroscópicos del chorro diésel y a su vez éstos sobre el proceso de mezcla aire-combustible. El presente trabajo parte de una revisión bibliográfica de la literatura sobre el proceso de inyección, dando un enfoque a la tasa de inyección sobre estrategias de inyección simple e inyección múltiple.

A razón de lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de poner en operación una instalación experimental que permite la realización de medida de tasa de inyección. Por tal motivo, el objetivo principal de esta tesis es la puesta a punto de la instalación experimental compuesta por: (1) tasímetro tipo N, el cual permite la medición de la tasa de inyección, (2) una unidad electrónica, la cual recibe las señales emitidas por los sensores del tasímetro, (3) un sistema de inyección common-rail y (5) un Software analizador de inyección, mismo que permite el análisis de los datos obtenidos. Posteriormente se procedió a la validación de la instalación experimental, realizando ensayos de tasa de inyección bajo condiciones de estrategia de inyección simple e inyección partida, obteniendo valores del coeficiente de descarga del orden de los 0.8 y 0.9, los cuales son consistentes con los reportados en la literatura; por consiguiente, se concluye que con la instalación experimental, se podrá analizar estudios robustos de la tasa de inyección.

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

*En este primer capítulo se presenta, la motivación para la realización de este estudio y se detallan los antecedentes del campo de conocimiento en que se enmarca la investigación.*

## 1.1 MOTIVACIÓN

En las ultimas décadas las emisiones de los motores de combustión interna, han causado preocupación debido al calentamiento global, la degradación del medio ambiente y los efectos adversos para la salud. Las emisiones producidas por los motores de combustión interna son los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), hidrocarburos sin quemar ( $HC$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y material particulado (PM) [1]. En respuesta a estas consecuencias negativas se han propuesto estrictas regulaciones de emisiones contaminantes en la industria automotriz, por lo que en México la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), creó la NORMA Oficial *NOM-044-SEMARNAT-2017*, que establece los limites máximos permisibles de hidrocarburos totales, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diésel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos. Mientras que en la Unión Europea, se creó un conjunto de normativas que regulan los limites aceptables para las emisiones de gases provenientes de los motores de combustión interna, conocidas como normas *EURO*. Desde su implementación, estas normas han ido evolucionando y se han vuelto más restrictivas, al día de hoy se encuentra vigente la versión EURO VI, como se muestra en la Figura 1.1.

Las estrictas regulaciones de emisiones contaminantes han impulsado a las compañías automotrices a mejorar el rendimiento del motor y en respuesta a esto, se presentan tecnologías basadas en el proceso de inyección, como el análisis de la tasa de inyección y coeficiente de descarga, ya que, estos parámetros determinan la forma y cantidad que se introduce de combustible.

La tasa de inyección, se define como el flujo másico instantáneo a la salida del orificio del inyector diésel y se deriva de la combinación de diferentes parámetros, como geometría de la tobera diésel, condiciones de operación como presión de inyec-

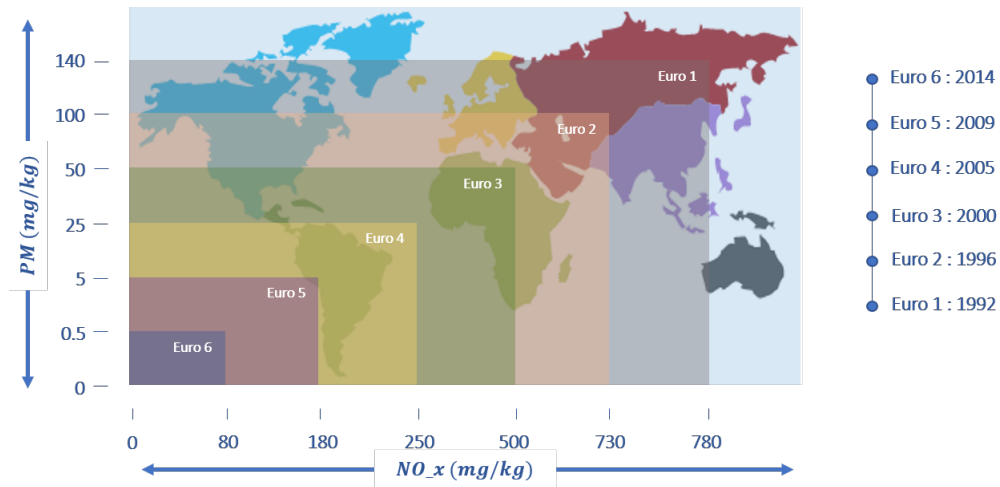


Figura 1.1: Evolución histórica de la norma EURO.

ción, contrapresión, tiempo de energización, número de inyecciones y propiedades físicas del combustible entre las que destacan densidad, viscosidad y tensión superficial. Por lo tanto, para identificar el efecto de las propiedades físicas del combustible y de las condiciones de operación se considera de suma importancia ya que afecta directamente la evolución del chorro diésel, y su interacción en el proceso de mezcla aire-combustible, emisiones contaminantes y ruido de la combustión [2].

De igual manera se proponen desarrollos tecnológicos, los cuales permiten reducir las emisiones contaminantes, éstos se dividen en dos grupos:

**Soluciones activas**, las cuales se desarrollan en el interior del cilindro a partir de la realización de modificaciones en los sistemas de gestión del aire o de inyección. Dentro de las soluciones referidas al sistema de gestión del aire se tiene las que mejoran el funcionamiento del motor como es la turbosobrealimentación con turbinas de geometría fija y variables, con enfriador y sobrealimentación en varias etapas. También la recirculación de los gases de escape (EGR) (por sus siglas en inglés *Exhaust Gas Recirculation*). Y dentro de las soluciones enfocadas al sistema de inyección se encuentran la geometría de la tobera, el incremento de la presión de inyección y la ley de inyección escalonada o estrategias de inyección múltiple, éstas tienen como objetivo reducir la cantidad de combustible introducido en el tiempo

de retraso, reduciendo el calor liberado en la parte de la premezclada, lo que reduce el ruido por un lado y reduce las emisiones de  $NO_x$  [3, 4].

**Soluciones pasivas**, son estrategias basadas en la eliminación o retención de emisiones contaminantes, una vez producidas en el interior de la cámara de combustión mediante la instalación de dispositivos de post-tratamiento específicos en la línea de escape. Dentro de éstas se encuentra el filtro de partículas para motores diésel (DPF) (por sus siglas en inglés) *Diesel Particulae Filter*, por otro lado se tienen dispositivos para la eliminación de  $NO_x$  como son los SCR (Por sus siglas en inglés *Selective Catalytic Reduction*), que generalmente incluye una sustancia que se mezcla con los gases [5].

De acuerdo con lo anterior, el principal criterio para el diseño de los motores se fundamenta en el cumplimiento de la normativa vigente con el menor consumo de combustible y menor costo de fabricación. En relación con las emisiones contaminantes, las normativas futuras serán más estrictas por lo que se hace indispensable el uso de soluciones pasivas. Si bien esta tecnología es de fácil implementación con un costo razonable para los vehículos. Por lo tanto parece necesario que junto con las soluciones pasivas se investigue en soluciones activas, de tal forma que las dificultades derivadas del uso de soluciones pasivas disminuyan. Dentro de las diferentes soluciones activas, se encuentran las estrategias de inyección múltiple, las cuales mejoran los inconvenientes derivados del uso de estrategias pasivas [6].

## 1.2 ANTECEDENTES

En el año de 1898, el ingeniero de origen alemán, Rudolf Diesel, invento lo que ahora se conoce como motor Diesel, éste consiste en utilizar el aire altamente comprimido para encender una carga de combustible inyectado en el cilindro, con lo cual se mostró obtener una mayor eficiencia que los otros tipos de motores de esa época [7].

Desde su aparición, el motor de combustión interna ha tenido que superar una serie de problemas y nuevas exigencias, que con el paso del tiempo se le han ido presentando. Las dos condiciones más importantes son la emisión de contaminantes y el consumo de combustible.

Si la combustión de los motores fuese completa y estequiométrica del aire, las emisiones contaminantes serían únicamente nitrógeno ( $N_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y vapor de agua ( $H_2O$ ). Evidentemente, esto no es así, la combustión es incompleta y, dependiendo del tipo y condiciones de funcionamiento del motor de combustión interna, en las emisiones arrojadas a la atmósfera a través del tubo de escape se puede localizar una cantidad de componentes nocivos próxima al 1 % [8].

A este panorama se presentan respuestas como la investigación en nuevas estrategias, con la finalidad de cubrir los requerimientos establecidos en las normativas vigentes, como lo es la inyección de combustible, inyecciones múltiples y combustiones a baja temperatura. En el caso de las estrategias de inyección múltiple se destaca la estrategia de inyección piloto, la cual consiste en inyectar una pequeña masa de combustible previa a la cantidad de combustible asociada a la inyección principal, ésta estrategia ha tenido diversas aplicaciones tanto para motores de inyección directa y en motores de combustión interna con precámara.

El combustible introducido en la inyección piloto provoca que la cantidad de combustible quemado en la pre-mezcla reduzca en comparación con una estrategia de inyección simple. Esta reducción es mayor cuanto mayor es el tiempo de retraso del motor, por lo que reducir la cantidad de combustible quemado en la pre-mezcla es adecuada para la reducción del gradiente de presión de la primera etapa del proceso de combustión en el cilindro y por lo tanto, el ruido de combustión y la marcha del motor, modificando así la ley de liberación de calor y la evolución de las variables termodinámicas dentro del cilindro, lo que lleva a influir tanto en la presión media indicada del motor como en la de emisiones contaminantes [9].

Finalmente, una manera de conocer la cantidad de combustible inyectado bajo estrategias de inyección simple o múltiple, es mediante la tasa de inyección, la cual se define como el flujo másico instantáneo a la salida del orificio del inyector. Las características de la combustión y los parámetros macroscópicos del chorro diésel como lo son: la penetración y el ángulo, dependen de la tasa de inyección, así como de las condiciones de operación del sistema de inyección y las propiedades físicas del combustible [10, 11].

El dispositivo de medición para este sistema esta basado en el método Bosch, el cual está compuesto por un tubo presurizado de combustible liquido con un diámetro conocido. El sistema utiliza nitrógeno con el fin de simular las condiciones de contrapresión que se tienen en un motor diésel, el combustible entregado por la tobera diésel genera una aumento en la presión del tubo, la cual es proporcional a la cantidad de combustible inyectado [12]. Por consiguiente, resulta de gran interés el estudio de la tasa de inyección y el coeficiente de descarga en inyectores diésel solenoide.



## CAPÍTULO 2

# ESTADO ACTUAL DEL PROCESO DE INYECCIÓN

---

*Este capítulo tiene como objetivo describir los aspectos más importantes del proceso de inyección como es el sistema de inyección diésel, así como el funcionamiento del inyector diésel solenoide, fundamentos de la tasa de inyección, flujo interno en las toberas diésel, desarrollo del chorro diésel y sobre las propiedades físicas del combustible. A partir de esta revisión bibliográfica se define el comportamiento del fenómeno de entrega de combustible.*

## 2.1 PROCESO DE INYECCIÓN

### 2.1.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL

El sistema de inyección es el responsable de la entrega de combustible al motor diésel para su funcionamiento. Por lo tanto este sistema tiene que cumplir con las siguientes funciones básicas:

- Introducir el combustible en el interior de la cámara de combustión según una ley (denominada tasa de inyección o ley de entrega) que va a definir el comportamiento de la diferentes fases de la combustión en sincronía con el movimiento del pistón.
- Atomizar el combustible para aumentar la superficie de contacto con el aire caliente tras la etapa de compresión y acelerar la evaporación.
- Mezclar el combustible con el aire disponible en la cámara de combustión.

Según el rango de presiones de trabajo, se distinguen dos partes fundamentales del sistema de inyección, la primera es de baja presión (desde presión atmosférica hasta una presión del orden de 0.3 MPa) y de alta presión (desde 10 hasta 200 MPa, dependiendo del punto de funcionamiento y del sistema considerado).

- Sistema de baja presión: Comprende el *deposito de combustible* y *filtros de combustibles* (los cuales retienen las sustancias sólidas contenidas en el combustible), la *bomba de alimentación* (que asegura una presión a la entrada de la bomba de alta entre 0.2 y 0.3 MPa), el *regulador de presión* (que limita la presión de salida de la bomba de alimentación) y las *líneas de baja presión*.
- Sistema de alta presión: la presión del combustible, requerida para la inyección es generada por una bomba de alta presión, la cual asegura la presión necesaria

para trasladar el combustible hacia una pre-cámara o un sistema common-rail. Dicha generación depende del tipo de sistema de que se trate.

Dependiendo de la forma en que se produce la inyección de combustible, los sistemas de inyección pueden ser de *inyección directa* (*Direct Injection*, *DI* o de *inyección indirecta*, *IDI*).

- En un sistema de *inyección indirecta*, la cámara de combustión se encuentra dividida en dos partes: la precámara de inyección y la cámara de combustión propiamente dicha. En estos motores durante la carrera de compresión, el aire se introduce en la precámara, generándose turbulencia entre el espacio muerto ( o cámara de combustión) y la precámara. Se inyecta combustible, donde la elevada turbulencia del aire ayuda a que las partículas de combustible del chorro diésel se dispersen formando la mezcla de aire-combustible. Este sistema de inyección no tiene mucha influencia, por lo que no se necesitan sistemas de inyección muy sofisticados.
- En un sistema de *inyección directa* el combustible debe ser inyectado dentro de la cámara de combustión a elevada presión, atomizando el combustible con el fin de asegurar una correcta mezcla con el agente oxidante. Como apoyo al sistema de inyección, es habitual generar al aire un movimiento de rotación alrededor del eje del cilindro ocasionado por el diseño del colector de admisión, favoreciendo así la dispersión del combustible diésel en la cámara de combustión. En donde los inyectores diésel son más complejos que los de inyección indirecta, ya que están equipados con toberas de varios orificios, con diámetros entre  $100\ \mu m$  y  $250\ \mu m$ . También son más robustos ya que tienen que trabajar a altas presiones de inyección. Estos sistemas poseen un mayor rendimiento que los IDI, consecuencia de sus menores pérdidas de calor debido a la menor relación superficie/volumen, este hecho, ha llevado a que los sistemas DI desplacen del mercado a los sistemas IDI, estando estos últimos en desuso. El menor consumo y el mayor rendimiento de la inyección directa han favorecido

el constante aumento en la investigación con estos sistemas de inyección, y la extensión del campo de aplicación. Las características del sistema de inyección son:

- Presión de inyección elevada, la cual está del orden de los 200 MPa.
- Estrategias de inyección múltiple, las cuales consisten en dividir en dos o más partes el proceso de inyección, con el fin de reducir la cantidad de combustible introducido en el tiempo de retraso, por lo que reduce emisiones de  $NO_X$  en comparación con una inyección simple.
- Aumento del número de orificios de la tobera del inyector con el propósito de producir una atomización más homogénea [13].

### 2.1.2 TIPOS DE SISTEMA DE INYECCIÓN DIRECTA

Básicamente se distinguen dos grupos: *sistema de acción directa* y *sistema de acumulación*. Los sistemas de acción directa se componen por una bomba de alta presión, la cual está encargada de dosificar el combustible que se requiere en la cámara de combustión, mientras que el inyector diésel se encarga de atomizarlo. Donde, la presión de inyección depende del régimen de giro de la bomba. El inicio de la inyección depende de la propia presión de combustible, la cual ejerce una fuerza sobre el asiento de la aguja del inyector, venciendo así la acción de un muelle situado en el inyector (fuerza de pretensión.) Este tipo de sistemas fueron los primeros utilizados en los motores de inyección directa, pero su uso es cada vez menor, siendo desplazados en los últimos años por los *common-rail* e *inyector-bomba* que se describen más adelante.

En los *sistemas de acumulación* la bomba de alta presión tiene la función de aumentar la presión del combustible y mantenerla constante e igual al valor de consigna, mientras que el inyector diésel dosifica y atomiza el combustible. La apertura del inyector diésel puede estar gobernada mecánica o electrónicamente. En

los sistemas mecánicos la entrega de combustible depende del régimen de giro, lo que lleva a que en estos sistemas se empleen motores destinados a trabajar a régimen de giro constante (motores estacionarios).

Debido al aumento de la fiabilidad y al costo razonable de los sistemas en los que la apertura del inyector se gobierna electrónicamente, se ha desarrollado un sistema de acumulación electrónico *common-rail*. Estos sistemas permiten el control del inicio y la duración de la inyección, así como la precisión en la cantidad de combustible inyectado y la flexibilidad de realizar estrategias de inyección múltiple con el fin de disminuir de mejorar la mezcla aire-combustible para así controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno y el ruido de la combustión. Una de las ventajas más importantes de este sistema es la elevada presión de inyección con la que puede operar. La utilización de los sistemas common-rail han presentado un crecimiento desde 1998, siendo actualmente el sistema que más se utiliza en los motores Diesel.

Adicionalmente, de los dos grupos mencionados anteriormente, existe un tercero llamado *sistema inyector-bomba*. En este sistema, la bomba, la tobera diésel y la válvula electromagnética constituyen una unidad compacta que se fija directamente en la culata del motor, la cual es accionada por el árbol de levas del motor y electrónicamente es accionada por la ECU (o por sus siglas en inglés *engine control unit*). El principio de funcionamiento se centra en que la presión de inyección se genera en el mismo inyector a través del bombeo de un émbolo accionado por una leva. La principal ventaja de este sistema frente al sistema common-rail son las mayores presiones, sin embargo, la desventaja que presenta es la dependencia de esa presión con el régimen de giro y sobre todo la mayor complejidad de la culata del motor.

### 2.1.3 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL COMMON-RAIL

Como se ha mencionado anteriormente el sistema common-rail forma parte de los sistemas de acumulación, el cual se muestra en la Figura 2.1 a).

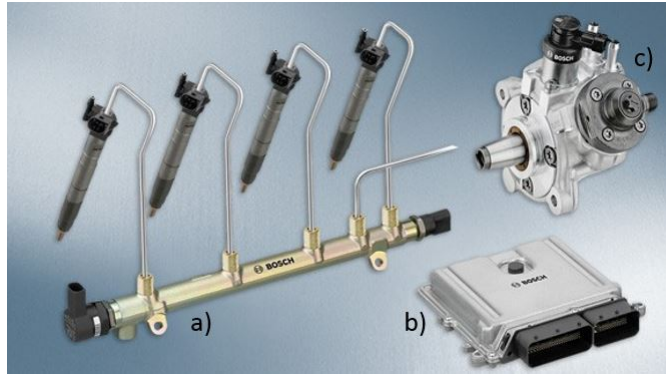


Figura 2.1: Sistema de inyección diésel common-rail.

Mediante una bomba de baja presión, el combustible es succionado del depósito y llevado a la bomba de alta presión Figura 2.1 c), donde es accionada por un motor y suministra gran parte del combustible a través de un depósito común (denominado common-rail) a los inyectores diésel, el resto de combustible es utilizado para el pilotaje hidráulico del inyector diésel. Otra de las función del rail es la amortiguación de las oscilaciones provocadas por el funcionamiento de la bomba de alta presión y por la brusca salida de combustible a través de los inyectores. La apertura y el cierre del inyector es controlada por una ECU Figura 2.1 b), donde la masa de combustible inyectado es determinado por la duración en la que la aguja permanece levantada, la presión de combustible en el common-rail y la capacidad de descarga de los orificios del inyector diésel. Cabe mencionar que el elemento de mayor importancia en este sistema es el inyector.

En la Figura 2.2 se observa un esquema de un inyector diésel solenoide de un sistema de inyección common-rail.

Los componentes principales de un inyector diésel solenoide son los siguientes:

- Una tobera multiorificio (D), con un muelle que empuja a la aguja de la tobera contra su asiento.
- Una varilla (P), que se mueve simultáneamente con la aguja de la tobera diésel durante el proceso de inyección.

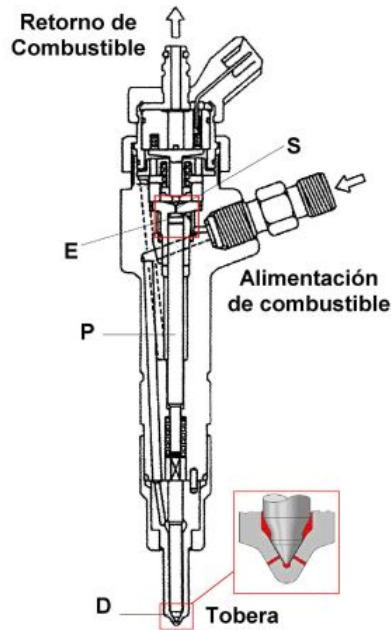


Figura 2.2: Esquema de un inyector diésel solenoide.

- Un orificio (E), que suministra el combustible a un volumen de control localizado en la parte superior de la varilla. La función de dicho volumen, es poder controlar el cierre o apertura de la aguja.
- Un orificio (S), ubicado en la salida del volumen de control, en donde su apertura y cierre está controlado por una válvula solenoide o piezoeléctrica.

Se identifican dos tipos de accionamiento para los inyectores diésel, el primero por una válvula solenoide y el segundo de forma piezoeléctrica [14]. En la Figura 2.3 se muestra un esquema de los componentes de un inyector tipo solenoide de un sistema de inyección diésel common-rail, el cual se describe enseguida:

Cuando el solenoide está desactivado, el orificio S se encuentra cerrado. La presión del combustible igual a la del common rail, actúa en la parte superior de la varilla, a través del orificio E, y en la parte inferior de la aguja de la tobera. Al ser la sección superior de la varilla mayor que la inferior de la aguja, además de la acción de la fuerza de pretensión del muelle, la aguja permanece en su asiento y los orificios de la tobera cerrados. Una vez activado el solenoide, se abre el orificio S y

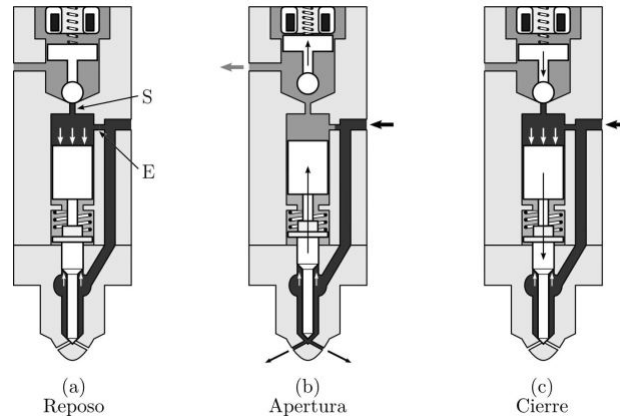


Figura 2.3: Funcionamiento de un inyector diésel solenoide.

como consecuencia, se reduce la presión en el volumen de control. En esta situación la presión en la parte superior de la varilla es menor que la de la parte inferior de la aguja, produciéndose el levantamiento del conjunto varilla-aguja, destapándose los orificios de descarga de la tobera, generando la inyección. El caudal de control liberado a través del orificio S vuelve al depósito a la espera de volver a ser inyectado. Al desactivar de nuevo la válvula del solenoide, el orificio S se cierra, y la presión ejercida sobre la parte superior de la varilla se recupera, produciendo el descenso del conjunto varilla-aguja y, como consecuencia, el cierre de los orificios de la tobera y el final de la inyección. En generaciones más modernas de este tipo de sistemas se está reemplazando la válvula solenoide por sistemas piezoeléctrico debido a la mejor estabilidad de este tipo de sistemas en inyecciones múltiples. En este tipo de sistemas la única diferencia es que la apertura del orificio de salida del volumen de control lo produce la dilatación de un material con características piezoeléctricas al aplicarle una tensión. El piezo, al dilatarse, actúa sobre un pistón de comando que empuja a su vez una pieza en forma de champiñón permitiendo al caudal de control fluir entre el champiñón y su asiento, y produciéndose el mismo efecto sobre la presión en el volumen de control que en el caso anterior [15].



## 2.2 FUNDAMENTOS DE LA TASA DE INYECCIÓN DIÉSEL

### 2.2.1 TASA DE INYECCIÓN DIÉSEL.

El combustible que es introducido en la cámara de combustión de un motor de combustión interna se caracteriza por la tasa de inyección, es decir, por el caudal de combustible que circula a través de los orificios de la tobera en cada instante del proceso de inyección. El desarrollo de la pulverización del chorro diésel, la formación de la mezcla aire/combustible y la combustión dependen directamente de la tasa de inyección. El equipo empleado en el presente trabajo para determinar la tasa de inyección, recibe el nombre de analizador de inyección o tasímetro y está basado en el método Bosch o de tubo largo. Este método está basado en la medida de variaciones de presión generadas por la propia inyección de combustible en el interior de un tubo de diámetro y longitud determinados, que contiene el mismo combustible inyectado a una determinada presión residual.

La principal ventaja de este método es su sencillez, facilidad de uso y precisión para la medición de masa de combustible que circula a través de los orificios del inyector. Una utilidad adicional que expresa la tasa de inyección además de conocer la forma en que se ha inyectado el combustible, es determinar el inicio y final de la inyección, como se muestra en la Figura 2.4. Debido a que el levantamiento de la aguja será la medida que se podrá obtener sistemáticamente en los ensayos de tasa de inyección, de aquí la importancia de referenciar el inicio real de inyección al levantamiento de la aguja. El criterio adoptado fue prolongar con una recta, de la misma pendiente que tiene el levantamiento de la aguja en su parte inicial, hasta interceptar el eje horizontal [16].

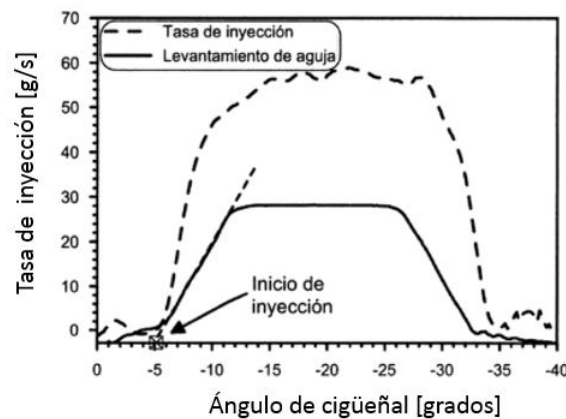


Figura 2.4: Determinación del inicio de inyección a partir de la medida de tasa de inyección.

### 2.2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

El interior del tasímetro, consiste en un montaje para el inyector, un tubo de medición, un orificio, un tubo posterior y una válvula.

El montaje, tiene la finalidad de colocar el inyector al comienzo del tubo de medición. Una vez que comienza la inyección, la entrada de combustible produce una onda de presión que es medida por un captador piezoeléctrico colocado lo más cerca del inyector, con el fin de limitar el desfase entre el instante en que se produce la inyección y la medida de dicha variación de presión. La onda de presión generada viaja a lo largo del tubo de sección hasta el otro extremo del tubo, donde es parcialmente amortiguada.

Cuando la onda llega al depósito y debido a la diferencia de diámetro del tubo en relación con el depósito, se produce una onda que se desplaza en sentido contrario a la onda principal, es decir, hacia el inyector. Para evitar que esta onda reflejada interaccione con la onda primaria y altere la señal de presión, en este tipo de instalaciones se utilizan tubos donde la relación entre la longitud y el diámetro sea lo suficientemente grande. La amplitud de la onda reflejada depende de la geo-

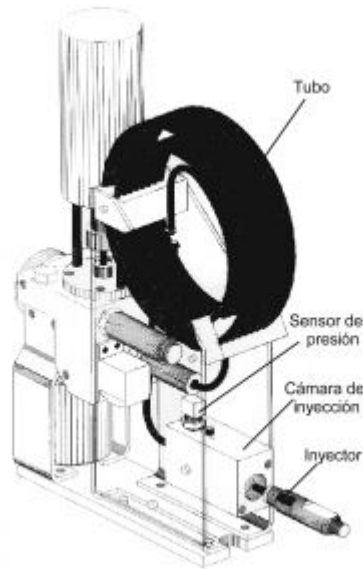


Figura 2.5: Método Bosch.

metría del sistema y de las condiciones de inyección, como es la presión de inyección, contrapresión y tiempo de energización. La válvula de control permite modificar la configuración del extremo del tubo y así limitar los efectos de las ondas reflejadas [17].

La onda de presión registrada, es generada por la propia inyección, se propaga aguas abajo y a partir de esta señal es posible obtener el flujo másico instantáneo de la inyección. Por lo tanto, se plantea el estudio de la propagación de una onda dentro de un tubo de sección constante  $A_t$ . La onda de presión se propaga a la velocidad del sonido  $a$  e induce una variación en la velocidad, y la densidad en la salida del fluido. El dispositivo mide esta variación de presión considerando un volumen de control constituido por un cilindro de sección  $A_t$  y longitud  $d$ , que envuelve la onda de presión. Suponiendo despreciables los efectos de la gravedad, las únicas fuerzas aplicadas sobre el volumen de control son las de presión. La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en la dirección del tubo, aplicada a este volumen de control, se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$(p + \Delta_p) A_t - p \cdot A_t = \rho \cdot A_t \cdot \Delta_u \quad (2.1)$$

donde  $p$  es la presión,  $\Delta p$  es el incremento de presión,  $A_t$  es la sección del tubo,  $\rho$  es la densidad del combustible,  $\Delta_u$  es la variación de la velocidad del flujo en el tubo. Simplificando la ecuación:

$$\Delta_p = \rho \cdot a \cdot \Delta_u \quad (2.2)$$

Por otra parte, la expresión de la variación del caudal másico,  $\dot{m}$ , al paso de la onda de presión se expresa como:

$$\dot{m} = \rho \cdot a \cdot \Delta_u \quad (2.3)$$

Por último, a partir de estas dos últimas ecuaciones se obtiene la expresión de la variación del caudal másico en función de la variación de presión:

$$\dot{m} = \frac{A_t}{a} \cdot \Delta_p \quad (2.4)$$

A partir de esta ecuación y conociendo la sección del tubo del tasímetro, la velocidad del sonido en el combustible a cierta temperatura y presión, se puede determinar el caudal másico inyectado o tasa de inyección [13, 18].

La velocidad del sonido delimita el movimiento de la onda de presión de un punto a otro de un conducto lleno de este fluido, en este caso del tasímetro. Así, considerando la propagación de una onda plana dentro de un tubo de sección constante  $A_t$ , la onda de presión se propaga a la velocidad del sonido  $a$  e induce una variación de la velocidad, la presión y la densidad de salida del fluido. La velocidad del sonido se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$a = \frac{L}{t} \quad (2.5)$$

donde  $L$  es la longitud del tubo y  $t$  es el tiempo que tarda en recorrer dicha longitud del tubo. Uno de los factores que influye directamente en la velocidad del sonido, el *modulo de compresibilidad*. El factor de compresibilidad del fluido o número de Bulk, que afecta el comportamiento hidráulico durante el proceso de inyección. Debido a las altas presiones a que es sometido el combustible. El módulo de compresibilidad se describe como reducción del volumen del combustible, haciendo referencia a la dilatación. Este se puede definir a través de la dilatación en los combustibles, bajo condiciones de baja presión o a partir de la velocidad del sonido en el fluido, por que el módulo isentropico de bulk esta relacionado con la velocidad de sonido [19, 20].

Varios investigadores como Rokopoulus et al. [21] concluyen que un mayor módulo de compresibilidad y un aumento en la velocidad del sonido, conduce a la elevación de la aguja del inyector.

Arcoumanis et al. [22] concluyen que la compresibilidad del combustible es una de las propiedades que influye durante el tiempo de inyección.

Boehman et al. [23] define al módulo de bulk de compresibilidad  $B_t$  y el módulo isentropico  $B_s$  a través de las siguientes expresiones:

$$B_t = -v\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = \rho\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T \quad (2.6)$$

$$B_s = -v\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_s = \rho\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s \quad (2.7)$$

donde  $v$  es el volumen especifico y  $\rho$  es la densidad. El módulo de bulk isentropico y de compresibilidad esta relacionado con la velocidad del sonido,  $a$ , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$B_s = \rho\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s = \rho \cdot a^2 \quad (2.8)$$

Una vez conociendo el modulo de Bulk isentropico y la densidad del fluido, se

puede obtener la velocidad de sonido mediante la siguiente expresión:

$$a^2 = \frac{B_s}{\rho} \quad (2.9)$$

### 2.2.3 EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN SOBRE LA TASA DE INYECCIÓN

Las condiciones de inyección apropiadas mejoran el rendimiento del motor de combustión interna, por esta razón Ziman Wang et al. [24] estudiaron el efecto de la presión de inyección sobre la cantidad de combustible inyectado. Ellos varían la presión de inyección desde 60 MPa hasta 120 MPa con tiempos de energización hasta de 1 ms. El combustible de análisis fue diésel. Como resultado exponen que la tasa de inyección incrementa en relación con las altas presiones de inyección, como se muestra en la Figura 2.6 a). Así mismo han observado que una inyección corta causa una apertura incompleta del inyector, por lo tanto la tasa de inyección disminuye, tal como se ve en la Figura 2.6 b).

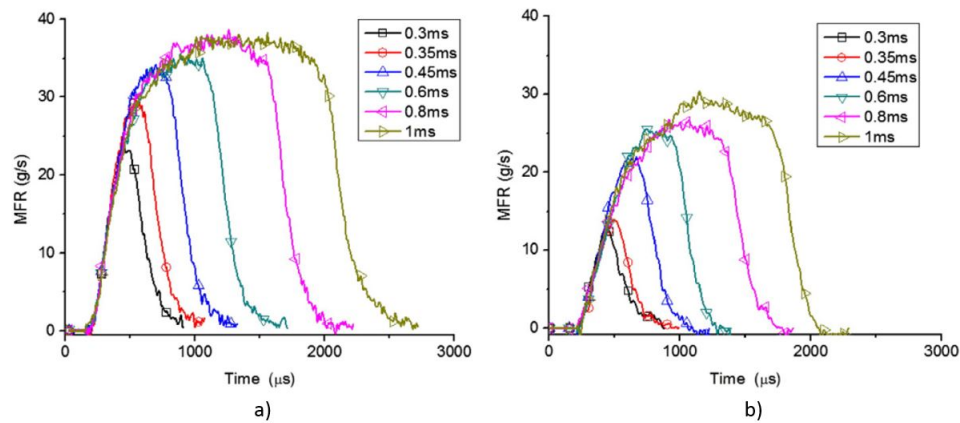


Figura 2.6: Efecto de la presión de inyección y tiempo de energización, sobre la tasa de inyección.

Por otro lado Payri et al. [25] investigaron los efectos de las condiciones de operación sobre la tasa de inyección utilizando diésel, concluyendo que a mayor presión de inyección, el incremento de la tasa de inyección es mayor, también que la tasa de inyección incrementa con valores de contrapresión bajos. Han et al. [26] reportan que la presión de inyección afecta principalmente el comportamiento de la aguja del inyector y una mayor presión induce que el movimiento de la aguja sea más rápido para alcanzar una elevación más alta.

Los resultados reportados por Postrioti et al. [27] mencionan que la tasa de inyección aumenta rápidamente al comienzo de la inyección, pero este comportamiento puede cambiar a medida que cambia la presión de inyección.

#### 2.2.4 EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS COMBUSTIBLES SOBRE LA TASA DE INYECCIÓN

Una de las propiedades físicas del combustible que afectan la tasa de inyección es la viscosidad cinemática, ya que altos valores de viscosidad provocan un mayor consumo de potencia de la bomba de combustible y de atomizaciones ineficientes [28]. Por otra parte, altos valores de viscosidad aumentan el coeficiente de fricción, por lo tanto la tasa de inyección se ve reducida [29]. Los parámetros macroscópicos del chorro diésel como el ángulo y la penetración afectan directamente a la mezcla aire-combustible [30], en éste caso, cuando la viscosidad del combustible diésel tiene valores bajos, el ángulo de penetración del chorro diésel disminuye, por lo que la eficiencia puede disminuir y las emisiones contaminantes incrementarse [31, 32]. Otra de las propiedades físicas del combustible, que afecta la tasa de inyección es la densidad, altos valores de ésta aumenta la eficiencia de la atomización del combustible [33].

Desanstes et al. [33] estudiaron el efecto de la densidad en mezclas binarias diésel/biodiésel en varios porcentajes de biodiésel (5 %, 30 % y 100 %) sobre la tasa

de inyección. Con condiciones de operación de presión de inyección desde los 30 a 160 MPa, contrapresiones desde 2 a 8 MPa y con tiempos de energización de 500 ms, 1000 ms, y 2000 ms. Los resultados mostraron que la tasa de inyección fue más alta para el biodiésel (100 %), esto debido al alto valor de densidad del combustible, concluyendo que entre mayor es la densidad, mayor será la entrega de combustible tal como se puede observar en la Figura 2.7.

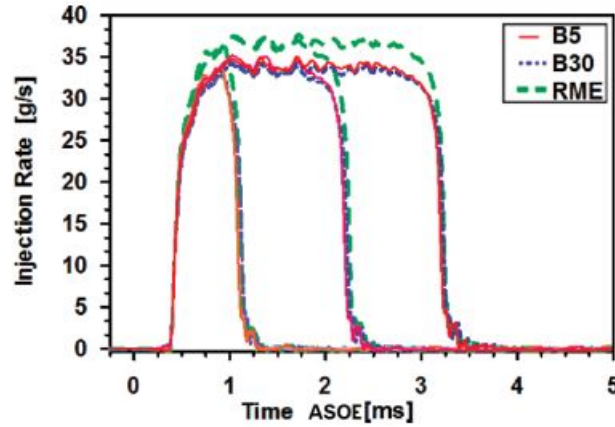


Figura 2.7: Tasa de inyección con una  $P_{rail}$  de 160 MPa, una  $P_{back}$  de 5 MPa, y tiempos de energización de 500, 1000 y 2000 ms.

En este estudio también realizaron inyecciones cortas, de masa inyectada de 1 mg, para todas las inyecciones, con condiciones de operación constante para todos los combustibles, con la finalidad de estudiar la dinámica de la aguja del inyector. En la Figura 2.8 se observa que para el biodiésel la apertura y el cierre del inyector es más lento. Esto indica que el retraso hidráulico se debe a la alta viscosidad del combustible, el cual controla la dinámica de la aguja.

Boudy et al. [34] también realizaron un estudio de tasa de inyección utilizando diésel y biodiésel como combustible, bajo estrategias de inyección múltiple, como resultado exponen que la densidad es la propiedad física principal que influye en la cantidad de combustible.



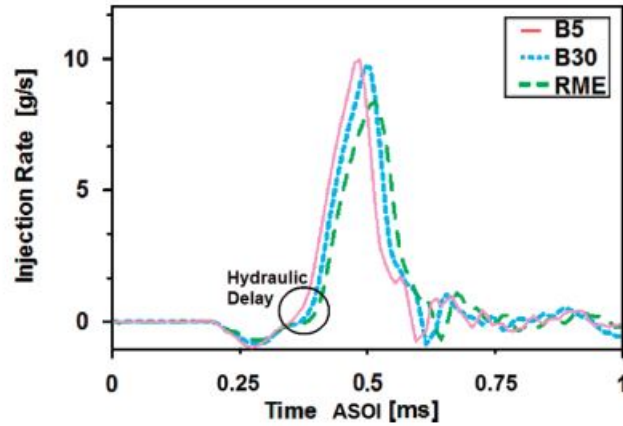


Figura 2.8: Tasa de inyección constante de 1 mg, obtenida a una  $P_{rail}$  de 30 MPa y una  $P_{back}$  de 5 MPa.

## 2.3 FLUJO INTERNO EN LAS TOBERAS DIÉSEL.

### 2.3.1 GEOMETRÍA EN LA TOBERA DIÉSEL.

Antes de proceder al estudio de las características del flujo en el interior de las toberas diésel es necesario describir la geometría típica de este tipo de elemento. En la Figura 2.9 se muestra un esquema de los dos tipos de tobera más utilizados actualmente: *VCO* (por sus siglas en inglés Valve Covered Orifice) y microsaco. Como se puede ver, en las toberas tipo *VCO* la posición de la aguja influye decisivamente en las características del flujo a la entrada de los orificios durante el comportamiento transitorio del inyector (procesos de apertura y cierre), mientras que en las toberas de tipo microsaco, el propio volumen del saco sirve para reducir esta influencia. Sin embargo, las toberas microsaco tienen un problema: la inyección residual del combustible remanente en el saco una vez que la aguja cierra el inyector se produce en condiciones poco controladas, lo que puede inducir a una combustión poco eficiente de este combustible.

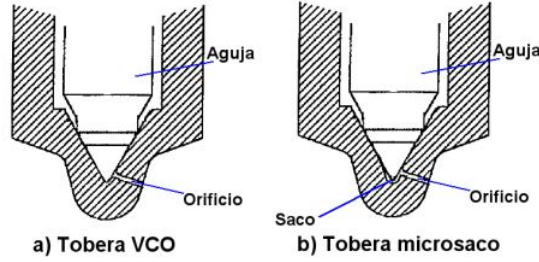


Figura 2.9: Especificaciones de la geometría de una tobera diésel tipo VCO y una microsaco.

Los parámetros geométricos más importantes en los orificios de descarga de una tobera diésel son: diámetro de entrada y salida del orificio,  $D_e$  y  $D_o$ , longitud  $L$  y radio de entrada  $r_e$ , los cuales se muestran en la Figura 2.10.

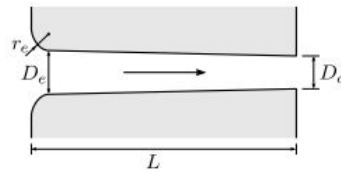


Figura 2.10: Parámetros más importantes de un orificio de descarga de una tobera diésel.

Para cuantificar la convergencia del orificio se utiliza el parámetro *k-factor* definido como:

$$k - factor = \frac{D_e - D_o}{10[\mu m]} \quad (2.10)$$

Estos parámetros tienen una influencia decisiva sobre las características del flujo interno. Es por ello que se han desarrollado técnicas experimentales que sirven para obtener la información de la geometría de los orificios, como lo es el método basado en la extracción de moldes de silicona de la geometría interna de los orificios [35].

### 2.3.2 VELOCIDAD Y ÁREA EFECTIVA

La velocidad y área efectiva son dos parámetros utilizados en el estudio del proceso de inyección. En la Figura 2.11 (a) se muestra el flujo a la salida de la tobera, donde se considera la presencia de burbujas provenientes de la cavitación, originadas en la esquina de entrada al orificio y en la Figura 2.11 (b) una situación equivalente simplificada.

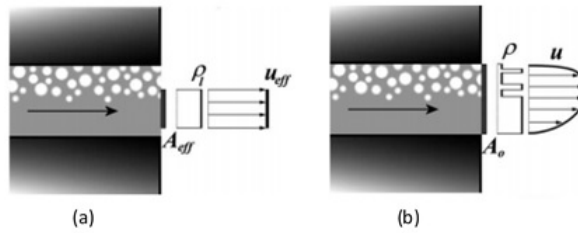


Figura 2.11: Representación del área y velocidad efectiva.

El flujo de salida de un orificio de inyección, está determinado por un perfil de densidad y velocidad. Por otra parte, el flujo sale al exterior a través del área geométrica real del orificio. Considerando que fluye a través de un área efectiva de inyección, con una densidad constante e igual a la del líquido y una velocidad efectiva uniforme a lo largo de la sección efectiva de inyección. El gasto másico en función de las variables características del flujo se puede representar con la siguiente ecuación:

$$\dot{m}^f = \int_{A_o} \rho \cdot u \cdot dA = A_{ef} \cdot \rho_f \cdot u_{ef} \quad (2.11)$$

y el flujo de cantidad de movimiento como:

$$\dot{m}^f = \rho \cdot u^2 \cdot dA = A_{ef} \cdot \rho_f \cdot u_{ef}^2 \quad (2.12)$$

Combinando las ecuaciones anteriores se puede obtener la velocidad efectiva, como el área efectiva a la salida de la tobera:

$$u_{ef} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f} \quad (2.13)$$

Las pérdidas de área efectiva con respecto al área geométrica están relacionadas. Las causas de las pérdidas del área efectiva con respecto a la geometría son las siguientes [36]:

- Perfil de velocidad no uniforme
- Cavitación en la salida del orificio
- Fenómeno de separación completa del flujo

### 2.3.3 COEFICIENTE DE DESCARGA

Uno de los parámetros para evaluar el flujo a través de orificios de inyección es el *coeficiente de descarga*. Este se define como el caudal másico real frente al teórico. Para obtener el caudal teórico, primero hay que evaluar la velocidad máxima para un salto de presiones dado. Esta se obtiene planteando la ecuación de Bernoulli entre aguas arriba, justo a la salida del orificio y suponiendo pérdidas nulas. Así pues, suponiendo despreciable la velocidad del fluido aguas arriba, se obtiene la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{teo}} = \frac{\dot{m}_{real}}{A_o \cdot \rho_f \cdot u_{teo}} \quad (2.14)$$

El flujo másico teórico se obtiene a partir de la ecuación de la conservación de la masa:

$$\dot{m}_{teo} = \rho_f \cdot A_o \cdot u_{teo} \quad (2.15)$$

donde  $\rho_f$  es la densidad del combustible,  $A_o$  es el área del orificio y  $u_{teo}$  es la velocidad teórica a través del orificio. Si se deriva la ecuación de Bernoulli, suponiendo una velocidad despreciable, resulta la siguiente ecuación:

$$u_{teo} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta_p}{\rho_f}} \quad (2.16)$$

donde  $\Delta_p$  es la caída de presión en el orificio. Por lo tanto, la ecuación 2.15 puede ser reescrita de la siguiente manera para expresar el caudal másico:

$$\dot{m} = C_d \cdot A_o \sqrt{2 \cdot \rho_f \cdot \Delta_p} \quad (2.17)$$

Fijándose en el coeficiente de descarga, éste se puede relacionar con el área de flujo efectivo y la velocidad, los cuales se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_a = \frac{A_{eff}}{A_o} \quad (2.18)$$

$$C_v = \frac{u_{eff}}{u_{th}} \quad (2.19)$$

por lo tanto, el coeficiente de descarga queda expresado de la siguiente manera:

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{th}} = \frac{\rho_f}{\rho_f} \frac{A_{eff}}{A_o} \frac{u_{eff}}{u_{th}} \quad (2.20)$$

Por lo tanto, las pérdidas a través de un orificio se pueden atribuir a una pérdida efectiva en el área o una pérdida efectiva en la velocidad [37]. En el caso del coeficiente de área, puede disminuir por una velocidad no uniforme en la salida, cavitación o separación de flujo. El régimen de flujo laminar, turbulento o en transición es el factor más influyente en el coeficiente de descarga y se puede describir por medio del número teórico de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot u_{teo} \cdot D_o}{\mu_f} = \frac{u_{teo} \cdot D_o}{\nu_f} \quad (2.21)$$

donde  $\mu_f$  es la viscosidad absoluta del combustible y  $\nu_f$  es la viscosidad cinemática,  $D_o$  es el diámetro fuera del orificio. En la literatura, se ha encontrado que el coeficiente de descarga incrementa con valores altos del número de Reynolds [38]. Por lo tanto, para valores bajos (flujo laminar), existe un mayor espesor en la capa límite lo que reduce el área efectiva y la velocidad debido a la fricción [35], mientras que para valores más altos que los de transición, la velocidad es más uniforme y la fricción viscosa se reduce. Por lo tanto, la temperatura juega un papel importante debido a su influencia en el  $Re$  y el régimen de flujo a través de la densidad y viscosidad del combustible [37].

Salvador et al. [39] estudiaron la influencia de la presión de inyección y la temperatura sobre el coeficiente de descarga, utilizando diésel como combustible, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 2.12.

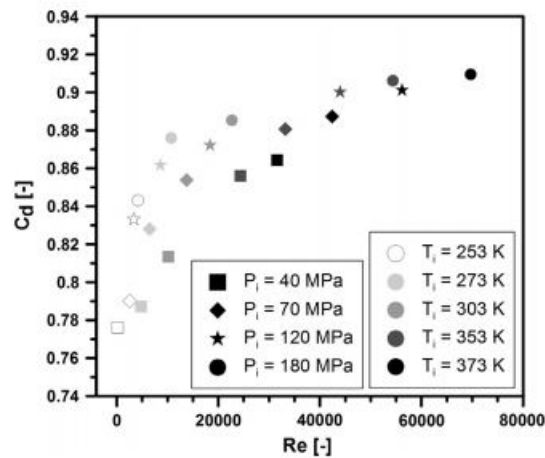


Figura 2.12: Coeficiente de descarga en función del número de Reynolds.

Concretamente, ellos encontraron que a que altos valores de temperaturas y presión de inyección, conducen a un número de Reynolds mayor, por lo tanto, el flujo se desarrolla en la zona turbulenta y las pérdidas de velocidad y fricción se minimizan. Sin embargo, cuando el flujo se desarrolla en la zona de transición laminar-turbulento, los valores de  $Re$  son más bajos, en ésta zona la velocidad del flujo en la tobera no es uniforme y existe una capa límite que aumenta el espesor y se producen pérdidas debido a la fricción. Esto induce a un área efectiva más baja para el flujo junto con

una velocidad efectiva más baja cerca de la pared, por lo tanto, los valores de  $C_a$  y  $C_v$  conducen a bajos valores de  $C_d$ .

## 2.4 CHORRO DIÉSEL

### 2.4.1 PROCESO DE ATOMIZACIÓN

Para que se lleve a cabo el proceso de combustión, el combustible debe introducirse en la cámara de combustión, mezclarse con el aire presente y evaporarse. Para efectuar lo anterior, el primer paso consiste en pasar una columna líquida integrado por gotas de tamaño pequeño, con el fin de que el proceso de evaporación sea más eficiente. A este proceso se le conoce como atomización. Desde que el combustible sale del orificio de la tobera del inyector diésel, el líquido se encuentra bajo fuerzas de cohesión y disruptivas, cuyo efecto trata de producir perturbaciones en su estructura. Si llegan a superar en intensidad a las fuerzas cohesivas, se generan oscilaciones en la superficie del chorro diésel provocando la ruptura, a esto se le llama *atomización primaria*. Posteriormente, si las gotas producidas son suficientemente grandes, se produce una segunda ruptura de estas gotas, hasta alcanzar un tamaño que mantenga su equilibrio, a este proceso se le conoce como *atomización secundaria* [7]. Por lo tanto, aumenta la superficie de contacto existente entre el aire y el combustible favoreciendo el proceso de mezcla entre el aire y combustible.

### 2.4.2 REGÍMENES DE ATOMIZACIÓN

Se ha observado que la atomización primaria depende de las condiciones con que el líquido es inyectado y de acuerdo con una serie de estudios experimentales realizado por Lefèvre [40] existen cuatro tipos de regímenes de atomización, los cuales se muestran en la Figura 2.13.

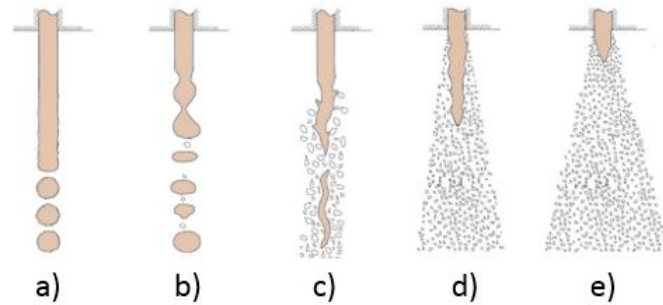


Figura 2.13: Regímenes de atomización.

- *Régimen de Rayleigh.* Este régimen se da para velocidades de inyección del orden de 10 m/s, donde la atomización de la vena líquida se debe a la tensión superficial, como se observa en la Figura 2.13 a). Se crean deformaciones radiales axisimétricas debido a la interacción entre las perturbaciones iniciales en la superficie del chorro diésel y las fuerzas de tensión. Estas deformaciones aumentan hasta provocar la ruptura de la vena líquida, en gotas de tamaño uniforme y mayor al diámetro de salida del orificio.
- *Régimen inducido por interacción aerodinámica.* La tensión superficial aumenta debido a la velocidad entre la vena líquida y el gas de la cámara de descarga. Para velocidades bajas la interacción dinámica aumenta las inestabilidades axisimétricas debido a la tensión superficial, facilitando de esta manera la ruptura del chorro diésel y generando gotas de combustible cuyo diámetro es del mismo orden de magnitud que la vena líquida. Para las velocidades altas, las fuerzas aerodinámicas cobran importancia frente a las de tensión superficial, donde el chorro diésel llega a oscilar alrededor de su eje de simetría de forma helicoidal. Por lo tanto, la atomización se produce lejos del orificio de descarga, de forma similar al caso anterior y el diámetro de la gotas de combustible es similar al orificio de salida, lo anterior se puede observar en la Figura 2.13 b).
- *Segundo régimen inducido por la interacción aerodinámica.* Las fuerzas aerodinámicas comienzan a tener mayor importancia debido al aumento de la velocidad. La superficie cilíndrica de la vena líquida se cubre de oscilaciones



generadas por la turbulencia a la salida del inyector y por la interacción aerodinámica. Estas perturbaciones aumentan debido a las fuerzas aerodinámicas hasta lograr separar las gotas de combustible. La atomización se produce a distancias más cercanas al orificio de la tobera diésel, generándose gotas de combustible de forma irregular, como se muestra en la Figura 2.13 c).

- *Régimen de atomización.* A medida del incremento de la velocidad de inyección, la separación de las gotas de combustible es más cercana al orificio de la tobera diésel. Lo que genera un diámetro de las gotas de combustible mucho menor al orificio de salida, tal como se muestra en la Figura 2.13 d) y e).

## 2.5 PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DIÉSEL

### 2.5.1 PARÁMETROS MACROSCÓPICOS

Desde el punto de vista macroscópico, se distinguen la penetración y ángulo del chorro diésel, que se muestran en la Figura 2.14. Por otro lado, desde el punto de vista microscópico se puede definir la distribución del diámetro, distribución de la velocidad y concentración de las gotas de combustible.

**Penetración del chorro diésel.** Se define como la distancia que recorre el frente del chorro diésel en el seno del gas ambiente tomando como origen el orificio de salida de la tobera diésel. Cabe resaltar que este parámetro es de suma importancia en el estudio de los chorros diésel, ya que determina en gran medida tanto el proceso de mezcla aire-combustible, así, como el momento de impacto del chorro diésel con las paredes de la cámara, factor que influye en mayor o menor medida en el desarrollo del proceso de combustión y la formación de emisiones [41].

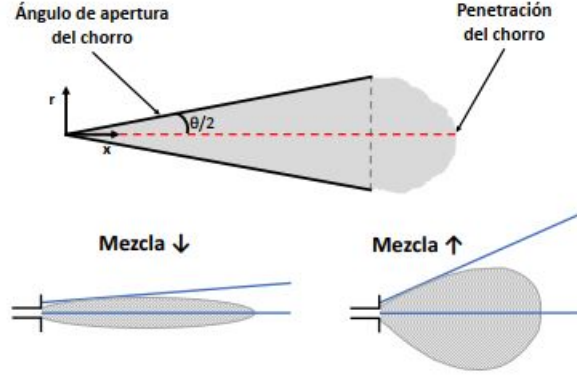


Figura 2.14: Parámetros macroscópicos del chorro diésel.

Wakuru et al. [42], propusieron una correlación para la penetración del chorro, la cual relaciona las variables antes mencionadas y se define a través la siguiente ecuación:

$$S(t) = \frac{(2.C_d^2)^{1/4}}{\tan(\frac{\theta}{2})^{1/2}} \cdot \left(\frac{\Delta p}{\rho_g}\right)^{1/4} \cdot \phi^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad (2.22)$$

donde  $C_d$  se describe como coeficiente de descarga,  $\theta$  es el ángulo de apertura del chorro,  $\Delta_p$  es la diferencia entre la presión del medio y la presión de inyección,  $\rho$  es la densidad del gas,  $\phi$  es el diámetro geométrico de la tobera y  $t$  es el tiempo transcurrido desde el inicio de la inyección. A partir de ensayos de visualización con una tobera multiorificio, Payri et al. [43] encontraron una correlación para el comportamiento de la penetración en sus primeras etapas, la cual se describe mediante la siguiente ecuación:

$$S(t) = 0.00243 \cdot \rho_a^{-0.218} \cdot \Delta_p^{0.575} \cdot t^{0.997} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)^{-0.197} \quad (2.23)$$

donde  $\Delta_p$  es la diferencia de presión del medio y la presión de inyección,  $\rho$  es la densidad del gas,  $\phi$  es el diámetro geométrico de la tobera diésel y  $t$  es el tiempo transcurrido desde el inicio de la inyección.

**Ángulo de la apertura del chorro.** El ángulo varía en función de la geometría de la tobera del inyector y las condiciones de inyección, así como de las

propiedades físicas del combustible y de las condiciones ambientales donde se inyecta. No existe una definición exacta de lo que es, pero se suele definir como el ángulo que forman dos rectas que se ajustan al contorno del chorro diésel, y que se cruzan en el orificio de salida del inyector. Este ángulo suele tener un valor entre  $5^\circ$  y  $30^\circ$ , y determina en gran medida la distribución macroscópica del combustible dentro de la cámara de combustión. Dent et al. [44] realizaron los primeros trabajos centrados en estudiar el ángulo del chorro diésel, llegando a la siguiente expresión:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \left(\frac{4 \cdot \pi}{A}\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_a}} \cdot F_t \left( \frac{\rho_a}{\rho_f} \cdot \frac{\sigma^2}{\mu_f^2 \cdot \nu_{eff}^2} \right) \quad (2.24)$$

donde  $\mu$  es la tensión superficial del combustible,  $\mu_f$  es la viscosidad dinámica del combustible,  $\nu_{eff}$  es la velocidad efectiva de inyección,  $A$  es una constante que depende de la geometría del orificio,  $F_t$  es una función obtenida de manera analítica por Taylor, cuyo valor límite es 0.288 en condiciones reales de inyección. El cociente de densidades en la ecuación muestra un claro efecto de los fenómenos aerodinámicos a los que se ve sometido el chorro diésel.

### 2.5.2 PARÁMETROS MICROSCÓPICOS

Desde el punto de vista microscópico se distinguen los siguiente:

**Distribución de diámetros de las gotas de combustible.** La dimensión de las gotas de combustible, depende de los procesos físicos que se producen durante el proceso de inyección. Las distribuciones de diámetros se caracterizan, utilizando algún diámetro medio característico, siendo los más utilizados el diámetro medio aritmético y el diámetro medio de Sauter (SMD), éste puede ser interpretado como el diámetro de las gotas de un chorro mono-disperso que tuvieran la misma relación de volumen superficie del chorro poli-disperso considerado. El SMD se relaciona con la ley de frenado de las gotas de combustible y con la tasa de evaporación. El cual es representado con la siguiente expresión:

$$D_{10} = \frac{\sum_{i=1}^k D_i}{\sum_{i=1}^k N_i} \quad (2.25)$$

$$SMD = \frac{\sum_{i=1}^k D_i^3}{\sum_{i=1}^k D_i^2} \quad (2.26)$$

donde  $N_i$  es el número de gotas de combustible de la población con diámetro  $D_i$ .

De acuerdo con diferentes trabajos se expone que disminuyendo el diámetro del orificio y aumentando la presión de inyección se consiguen diámetros de gota de combustible más pequeños [45].

**Distribución de la velocidad de las gotas de combustible.** Payri et al. [46] realizaron trabajos donde se estudian los perfiles axiales y radiales de las velocidades y concentraciones de gotas de combustible. Correas [47] propone la siguiente relación de perfiles radiales de tipo gaussiano tanto para la velocidad como para la concentración  $c$ :

$$u = u_{eje} \cdot \exp(-4.6 \cdot r^*) \quad (2.27)$$

$$c = c_{eje} \cdot \exp(-4.6 \cdot S_c \cdot r^*) \quad (2.28)$$

en donde,  $S_c$  es el número de Schmidt, representa el cociente entre el transporte de momento y masa,  $r^* = r/R$  es la coordenada radial normalizada, donde  $R$  es el radio del cono del chorro. Las velocidades y concentración están expresadas con respecto a los valores de éstos en el eje del chorro, con los cuales expresan la siguiente ecuación [48]:

$$\frac{c_{eje}}{u_{eje}} = \frac{1}{u_0} \propto \frac{1}{x} \quad (2.29)$$

donde  $u_0$  es la velocidad de salida del chorro diésel y  $x$  es la distancia desde el origen.

## 2.6 ESTRATEGIAS DE INYECCIÓN MÚLTIPLE

Las estrategias de inyección múltiple tienen como objetivo dividir el evento de inyección en dos o más partes. Atendiendo a los diferentes parámetros como es el número de eventos de inyección, dwell time y duración de los mismos, se distinguen tres configuraciones, las cuales se muestran en la Figura 2.15.

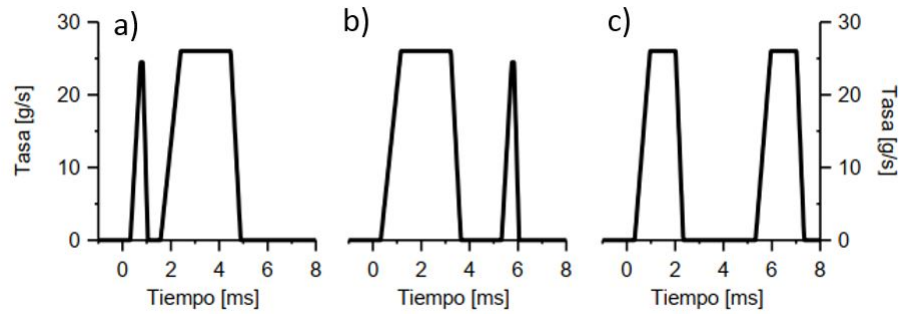


Figura 2.15: Estrategias de inyección múltiple: a) estrategia de inyección piloto, b) estrategia de post-inyección, y c) estrategia de inyección partida.

- a) *Estrategia de inyección piloto*: Consiste en partir la inyección en dos eventos. El primero introduce una masa pequeña de combustible en el interior del cilindro y el segundo evento de inyección se introduce la cantidad principal de combustible.
- b) *Estrategia de post-inyección*: Consiste en partir la inyección en dos eventos, en este caso la menor masa de combustible se introduce después del evento principal en que se introduce la mayor parte de la masa de combustible.
- c) *Estrategia de inyección partida*. Donde el total de la masa de combustible inyectada se divide en dos o más eventos iguales, por lo tanto no se consideran inyección piloto o post por su tamaño.

Una estrategia de inyección simple se define únicamente por el principio de la inyección y la duración de la misma, por el contrario, con la estrategia de inyección

múltiple, el número de grados de libertad a la hora de definir la secuencia crece con el número de pulsos (eventos de inyección), por el principio de la inyección (*Start of Injection Sol*) y por la duración entre cada dos pulsos (dwell time), es decir, el tiempo entre el final de una inyección y el inicio de la consecutiva, como se muestra en la Figura 2.16.

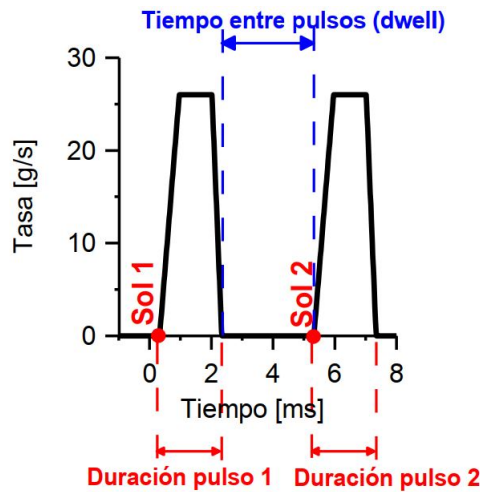


Figura 2.16: Parámetros de la estrategia de inyección múltiple, representados en una estrategia de inyección partida.

Cuando se realizan estrategias de inyección múltiple se presenta el fenómeno de interacción entre pulsos, éste será más relevante cuando más cerca estén entre sí los pulsos de inyección. La interacción entre pulsos implica que las condiciones en cámara sobre las que se inyecta un pulso son diferentes a las correspondientes al pulso de inyección precedente. Si se supone una estrategia de inyección partida de dos pulsos, la primera inyección no sólo crea movimiento en el gas ambiente en la dirección axial en la que es inyectada, sino que también genera turbulencia con las condiciones ambientales sobre las que se inyecta el chorro diésel de la segunda inyección son diferentes. Adicionalmente si el ambiente fuese reactivo, destacan dos circunstancias: Por un lado, el nivel de oxígeno que se encuentra en el chorro diésel de la segunda inyección es menor, ya que parte del mismo ha sido englobado por el chorro diésel de la primera inyección, y el nivel de temperatura sobre el que se inyecta el segundo pulso es mayor, debido a la combustión de la primera inyección.

### 2.6.1 TASA DE INYECCIÓN BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO.

El desarrollo y optimización de los motores Diésel requieren el control detallado del proceso de inyección de combustibles, por esta razón varios autores como Busch et al. [49] realizaron un estudio del perfil de tasa de inyección, para la estrategia de inyección piloto, manteniendo constante la inyección piloto de 310 ms, con variaciones del dwell time de 100 ms, 400 ms, 1200 ms, y con una inyección principal de 278 ms, 448 ms y 470 ms utilizando dos hidrocarburos respectivamente, DPRF58 (58 % heptameltinonano y 42 % n-hexadecano ) y PRF25 (75 % n-heptano y 25 % isooctano) como se muestra en la Figura 2.17

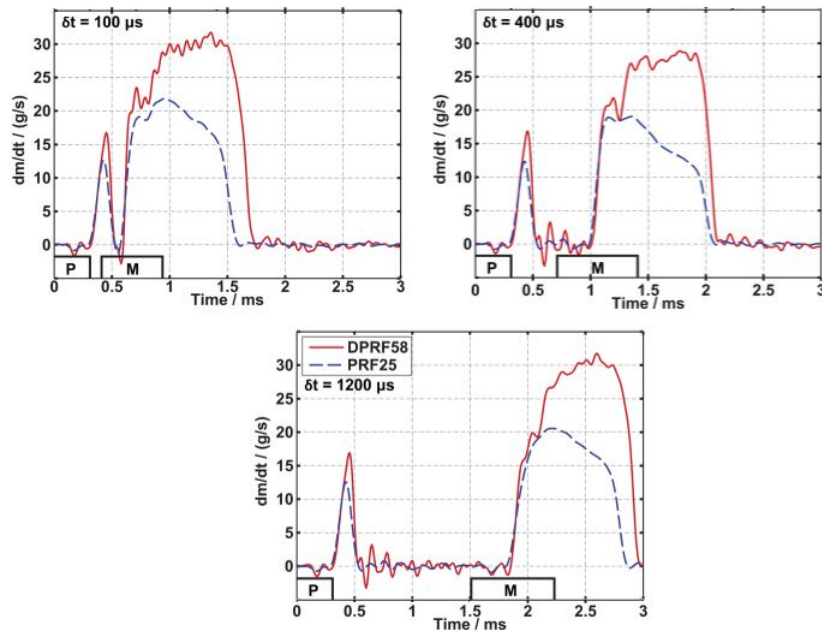


Figura 2.17: Perfil de tasa de inyección para DPRF58 y PRF25, con una  $P_{rail}$  de 80 MPa y dwell time de 100, 400 y 1200 ms

A partir de la Figura anterior, los autores concluyen que la tasa de inyección es mayor para el DPRF58, esto debido a los altos valores de la densidad y velocidad del sonido, lo que provoca que las ondas dentro del inyector sean más altas, lo que puede forzar la apertura del inyector en mayor medida con relación con el PRF25, por consiguiente la elevación máxima de la aguja es más alto, ésta tarda más en cerrar y por lo tanto, la duración de la inyección es mayor.

### 2.6.2 TASA DE INYECCIÓN BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PARTIDA

Dentro de las estrategias de inyección múltiple, se encuentra la estrategia de inyección partida, de la cual, cuyas características y proceso de combustión resulta ser más complicadas, debido a la fuerte interacción entre ambas inyecciones [50].

Las características de la inyección partida en comparación con la inyección simple, son significativamente diferentes, ya que en la inyección partida la aguja realiza varios movimientos en una duración de tiempo bastante corta, causando así complicaciones en la influencia entre la primera inyección partida y la segunda inyección [51].

Autores como Haichun Ding et al. [52] estudiaron los efectos de la estrategia de inyección partida sobre la tasa de inyección, donde se fijó una  $P_{back}$  con valor de 1 MPa, una presión de inyección ( $P_{rail}$ ) de 35 MPa, un tiempo de energización de 0.45 ms para cada inyección partida, donde estudiaron específicamente dos casos, el primero con un dwell time de 0.2 ms y el segundo con un dwell time de 0.3 ms. En Figura 2.18, se muestran los resultados para este estudio.



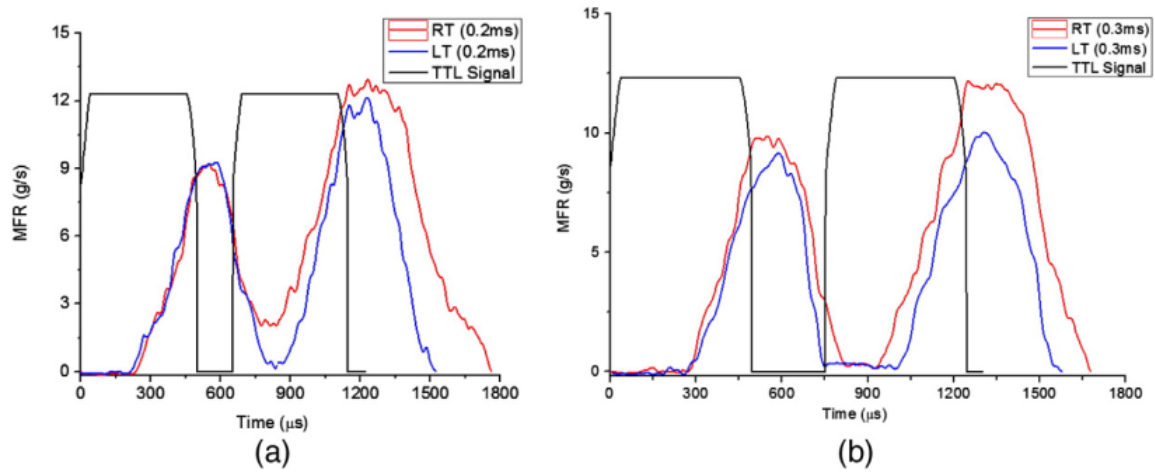


Figura 2.18: Tasa de inyección bajo una estrategia de inyección partida, con una  $P_{rail}$  de 35 MPa,  $P_{back}$  de 1 MPa

Concluyendo que las segundas inyecciones partidas presentan una tasa de inyección o flujo másico, con valores más altos en relación con los primeros, esto debido a que el inyector no ha cerrado completamente cuando comienza la segunda inyección partida. Por lo tanto el inicio de la segunda inyección partida conlleva a un mayor levantamiento de la aguja y por lo tanto un valor de flujo másico mayor.

Otro trabajo de tasa de inyección bajo la estrategia de inyección partida, es el presentado por Ziman Wang et al. [24] quienes investigaron la influencia de ésta estrategia sobre la tasa de inyección, variando el Dwell time, concluyendo así, que el cierre de la aguja del inyector, entre cada inyección partida, esta influenciada por la duración del Dwell time, ya que este determina la interacción entre las dos inyecciones.

## CAPÍTULO 3

# PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

---

*Este tercer capítulo está compuesto por cuatro apartados: En el primero se expone una breve síntesis de la revisión bibliográfica y se ponen de manifiesto las principales áreas de oportunidades, en el segundo se presenta la hipótesis del presente trabajo, en el tercer apartado los objetivos, tanto de carácter general como específicos, y por último se presenta la metodología general de la tesis.*

### 3.1 SÍNTESIS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En la actualidad y desde siempre la quema de combustibles en los motores de combustión interna, generan gases de escape que contienen principalmente óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar (HC), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y material particulado. Por tanto, se han planteado estrictas regulaciones a nivel mundial, creando en México la NORMA oficial *NOM-044-SEMARNAT-2017* y en la Unión Europea las normas *Euro*.

En respuesta a esta necesidad se han desarrollado tecnologías que se rigen por el cumplimiento de estas normativas medioambientales, planteando así las soluciones activas y pasivas, en donde las soluciones activas consisten en la realización de modificaciones en los sistemas de gestión del aire o de inyección. En relación con las soluciones referidas al sistema de gestión de aire se tienen las que mejoran el funcionamiento del motor, como es el enfriador, así como la recirculación de los gases de escape (EGR) (por sus siglas en ingles) *Exhaust Gas Recirculation*, y dentro de las soluciones enfocadas al sistema de inyección se encuentran la geometría de la tobera diésel, los efectos del incremento de presión y las estrategias de inyección múltiple; mientras que las soluciones pasivas consisten en la eliminación o retención de emisiones contaminantes, una vez producidas en el interior de la cámara de combustión mediante la instalación de dispositivos de post-tratamiento en la línea de escape, como son los filtros para partículas (DPF) (por sus siglas en ingles) *Diesel Particulae Filter*, por otro lado se tienen los dispositivos para la eliminación de  $NO_x$  como son los SCR (por sus siglas en ingles) *Selective Catalytic Reduction*.

Este trabajo se centrará en las soluciones activas, específicamente en el proceso de inyección a través de la tasa de inyección. Uno de los parámetros importantes a la hora de analizar el proceso de inyección es la tasa de inyección, a través de este parámetros se es capaz de caracterizar el flujo interno de los orificios de la tobera diésel. La tasa de inyección se define como el flujo másico de combustible instantáneo

a la salida del inyector diésel. La importancia de éste parámetro reside que es clave para la formación de la mezcla aire-combustible y para el proceso de combustión del motor Diesel. Este parámetro depende de la presión de inyección, contrapresión, tiempo de energización, el diámetro de la tobera, y de las propiedades físicas del combustible, en específico de la densidad.

Por lo dicho anteriormente, resulta de interés el estudio la caracterización del flujo interno de los orificios de la tobera diésel, bajo estrategias de inyección simple y estrategias de inyección múltiple.

## 3.2 HIPÓTESIS

Con base a todo lo anterior se plantea la siguiente hipótesis para esta investigación:

Mediante la puesta en operación de un tasímetro y con el desarrollo de una metodología experimental, y de análisis se es capaz de caracterizar el flujo interno de un inyector diésel.

## 3.3 OBJETIVOS

### 3.3.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente estudio es:

Establecer una metodología experimental, y de análisis para la medición de la tasa de inyección.

### 3.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Con la finalidad de alcanzar el objetivo general se plantean el siguiente objetivo de carácter específico:

- Medir la tasa de inyección diésel, bajo la estrategia de inyección simple e inyección partida.

## 3.4 METODOLOGÍA GENERAL DE LA TESIS

Para cumplir con los objetivos previamente descritos, se propuso la siguiente metodología general.

### **Instalación del tasímetro tipo N.**

La instalación del tasímetro tipo N se llevará a cabo en un banco de pruebas, el cual forma parte de los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Para ello se realizaron varias actividades como: (1) modificación en la ubicación del common-rail, (2) instalación de una canaleta, donde fueron alojados los sensores del tasímetro, (3) implementación de un sistema de despresurización, (4) construcción una mesa para colocar la balanza gavimétrica, y (5) instalación del Software analizador de inyección.

### **Instalación de la unidad de control**

La instalación del tasímetro tipo N se realizara en un banco de pruebas en el Laboratorio Flujo de Alta Velocidad, perteneciente al Laboratorio de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) de la Facultad de la Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

La instalación de la unidad de control se llevo a cabo en el banco de pruebas, mencionado anteriormente. Para ello se realizaron varias actividades como: (1) conexión correcta de los sensores provenientes del tasímetro, (2) conexión de la señal trigger, generada de la pinza amperimétrica Fluke, (3) conexión de la señal  $1/T$  proveniente de la tarjeta NI 9402, y por último (4) la conexión dirigida a la unidad de computo.

### **Calibración del tasímetro tipo N**

Para un correcto funcionamiento del tasímetro, y antes de comenzar con la experimentación, es necesario realizar una calibración la cual consiste en el ajuste de reflexiones de las ondas de presión, mediante el movimiento giratorio de un regulador, ubicado en la parte posterior del tasímetro. Se logra una calibración óptima, cuando se es posible observar menos de tres reflexiones de las ondas de presión por cada inyección.

### **Desarrollo de un circuito de control para inyectores diésel solenoide**

Para la realización del presente estudio se utilizó un circuito de control para la energización de inyectores diésel solenoide, bajo las configuraciones de inyección simple, y de inyección múltiple, el cual fue desarrollado en el trabajo de tesis de maestría de Sergio Borrego Alvarez [53]. A este circuito se le realizaron algunas modificaciones con la finalidad de obtener la señal de frecuencia  $1/T$  necesaria para el correcto funcionamiento de la unidad de control del tasímetro.

### **Validación de la instalación experimental**

Una vez que la instalación experimental está en operación y con su calibración realizada, se llevaron a cabo ensayos de tasa de inyección bajo la estrategia de inyección simple y dividida, con la finalidad de validar el correcto funcionamiento de la instalación experimental.

*Ensayos bajo una estrategia de inyección simple:* Para este estudio se fijó una presión de inyección de 100 MPa, una contrapresión del tasímetro de 1 MPa, y dos niveles de energización de 1 y 1.5 ms.

*Ensayos bajo una estrategia de inyección partida:* Para este estudio se fijó una presión de inyección de 100 MPa, una contrapresión al interior del tasímetro de 1 MPa y dos niveles de energización de 1 y 2 ms.

### **Análisis de resultados**

Una vez que se realizan los experimentos de tasa de inyección, se procede al procesamiento de los mismos, para ello se utiliza el *Software analizador de inyección*.

## CAPÍTULO 4

# HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

---

*En este capítulo se describen las herramientas experimentales empleadas en la realización del presente estudio. En primer lugar se presentan las instalaciones experimentales utilizadas, se describen los componentes del banco de pruebas, conformado por un sistema de inyección common-rail, el tasímetro junto con la unidad de control, el sistema de presurización, el circuito eléctrico que controla al inyector diésel solenoide, así como el Software encargado de analizar las señales de tasa de inyección.*



## 4.1 INSTALACIONES EXPERIMENTALES

### 4.1.1 BANCO DE PRUEBAS

Para la realización de los ensayos de inyección se hace uso del banco de pruebas que se encuentra en el laboratorio de flujo de alta velocidad, el cual forma parte de los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León. En la Figura 4.1 se muestra el banco de pruebas.



Figura 4.1: Banco de pruebas

Este banco de pruebas esta compuesto por un sistema de inyección diésel common-rail, tasímetro, unidad electrónica, sistema de presurización, circuito de control para inyectores diésel solenoide y el software encargado de recibir las señales provenientes de la unidad de control, seguidamente cada uno de los componentes son descritos.

### 4.1.2 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL COMMON-RAIL

Este sistema de inyección está compuesto por dos circuitos, el primero de baja presión, que consta de un depósito de combustible, purgador, dos filtros de combustible, bomba de baja presión, un intercambiador de calor y un regulador de presión. Y el segundo de alta presión, que consta de un inyector diésel, un sistema common-rail, una bomba de alta presión, un motor eléctrico y un variador de frecuencia para controlar su velocidad. En la Figura 4.2 se muestra un esquema de este sistema. Cuenta también con dos sensores de temperatura, uno toma la lectura de la temperatura del depósito de combustible y el otro la temperatura del combustible de retorno del inyector diésel. El sistema está controlado por un common-rail system tester que es capaz de simular las salidas de control de la ECU, concretamente permite controlar de forma manual los siguiente parámetros: **Presión del common-rail:** presión generadas por la bomba de alta presión y enviada hacia el common-rail. **Pulso eléctrico:** tiempo de energización del inyector diésel. **Frecuencia de inyección:** número de inyecciones por minuto.

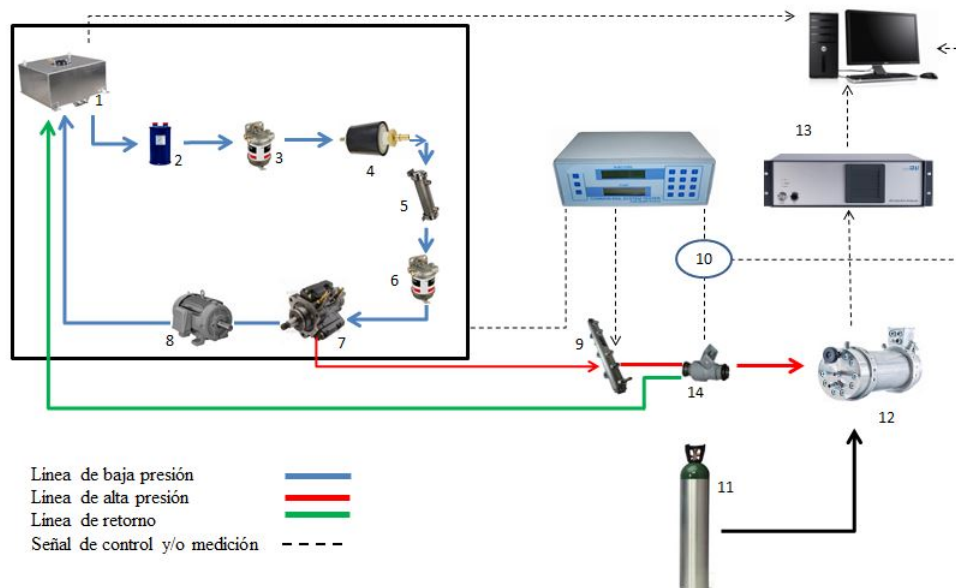


Figura 4.2: Esquema de inyección diésel common-rail.

Tabla 4.1: Sistema de inyección diésel common-rail.

1 Depósito de combustible	8 Motor eléctrico
2 Purgador	9 Common-rail
3 Filtro de combustible	10 Pinza amperimétrica
4 Bomba de baja presión	11 Tanque de $N_2$ y regulador de presión
5 Intercambiador de calor	12 tasímetro
6 Filtro de combustible	13 Unidad electrónica
7 Bomba de alta presión CP1	14 Inyector diésel solenoide

### 4.1.3 TASÍMETRO TIPO N

El laboratorio de Flujo de Alta Velocidad cuenta con un tasímetro de la marca iav (*por sus siglas en alemán Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr*), tipo N 050-050. En la Figura 4.3 se muestra un diagrama de sus componentes.

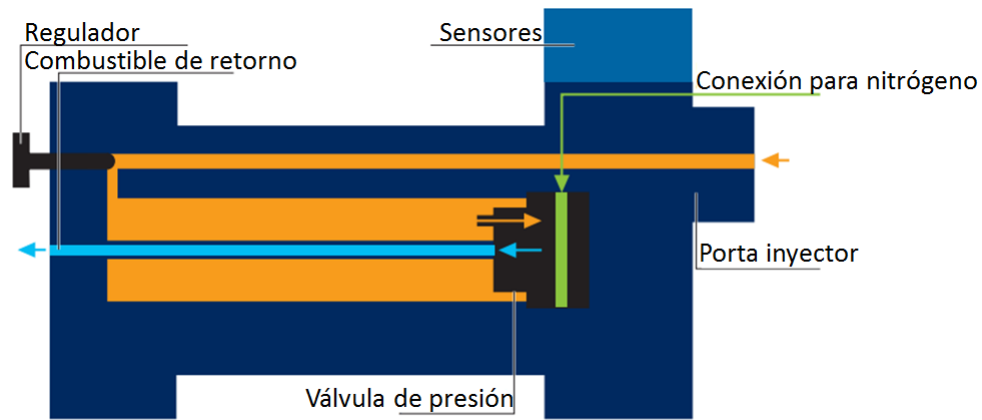


Figura 4.3: Tasímetro tipo N.

El tasímetro cuenta con cuatro sensores encargados de enviar las señales recibidas durante la inyección, las cuales se describen enseguida, *señal de tasa*: ésta representa la presión dinámica, *temperatura*: representa la temperatura cerca de la tobera de inyección, *presión estática*: representa la presión estática en el sistema, y *key*: representa la codificación del sistema.

*Conexión para nitrógeno:* Cuenta con una entrada de 15 mm para presurizar el sistema únicamente con nitrógeno, el sistema puede operar con un máximo de 200 bar. Cuando la presión en el tasímetro es mayor a la permitida, se activa la protección, es decir, un disco de ruptura.

*Porta inyector:* Éste permite la conexión del inyector hacia el tasímetro. El porta inyector se pueda montar al tasímetro y mediante un apriete de 25 Nm, garantiza la adaptación correcta.

*Regulador:* La función principal de éste regulador es ajustar las reflexiones causadas por la inyección.

*Conexión para el combustible de retorno:* Al momento de realizar una inyección, cuando el tasímetro se encuentra lleno de combustible, la masa inyectada sale del tasímetro a través de ésta conexión. También a partir de esta conexión es como se puede vaciar el sistema.

#### 4.1.4 SISTEMA DE PRESURIZACIÓN DE NITRÓGENO

El tasímetro cuenta con una conexión de entrada para nitrógeno con la finalidad de simular la contrapresión en un automóvil. Éste se suministra a través de un cilindro, conectado a un regulador de presión de entrada desde 0 a 3000 psi y presión de salida desde 0 a 2500 psi. El sistema de despresurización de nitrógeno, se ha instalado con el fin de drenar el nitrógeno, que se ha introducido al sistema; una vez que los ensayos de tasa han finalizado y así evitar dejar presurizado el sistema, evitando que este puede ser dañado. Así mismo este sistema junto con el sistema de presurización se es capaz de controlar el nivel de presión en el interior del sistema.

### 4.1.5 UNIDAD ELECTRÓNICA DEL TASÍMETRO

El tasímetro cuenta con una unidad electrónica (*EU*) que se encarga de servir como fuente de alimentación a los sensores y para el acondicionamiento de las señales. En la Figura 4.4 se muestran las conexiones y componentes que forman parte de la unidad de control.

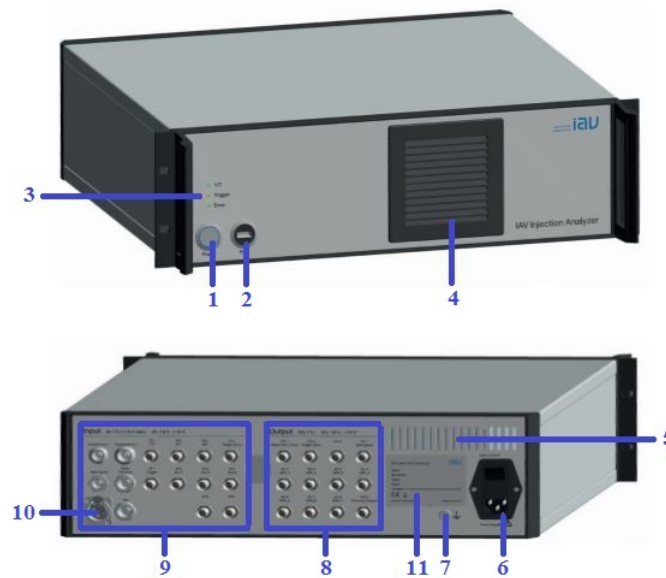


Figura 4.4: Componentes de la unidad electrónica.

Tabla 4.2: Componentes de la unidad electrónica

<b>1 on/ off</b>	<b>6 Fuente de alimentación</b>
<b>2 Puerto USB</b>	<b>7 Conexión a tierra</b>
<b>3 LEDS</b>	<b>8 Canales de salida</b>
<b>4 Ventilación de entrada</b>	<b>9 Canales de entrada</b>
<b>5 Ventilación de salida</b>	<b>10 Conexión ethernet</b>

### Consideraciones antes de la puesta en marcha de la unidad eléctrica.

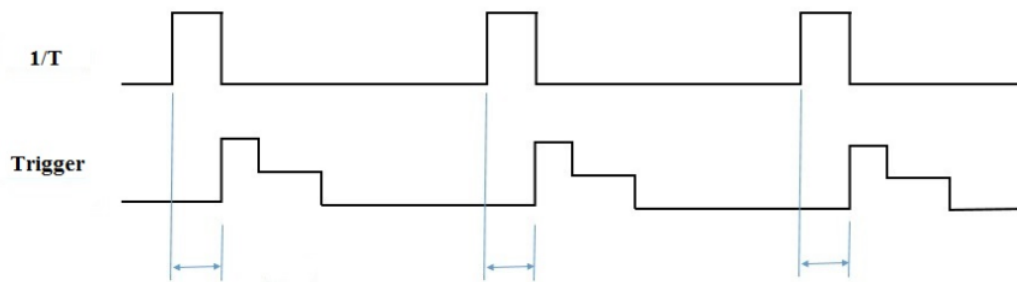
- Fase de calentamiento. Dando seguimiento al manual *IAV Injection Analyzer-Electronic Unit* [54] el sistema debe operar 60 minutos antes de comenzar con alguna medida de tasa de inyección relevante. Este es el tiempo necesario para el calentamiento de los amplificadores internos, así como para la grabación de datos de medición.
- Señales. Para el correcto funcionamiento de la unidad de control, es fundamental la señal  $1/T$ , la cual expresa la señal de frecuencia de inyección y *trigger* que representa el control del pulso eléctrico proveniente de cada inyección.

#### 4.1.6 CIRCUITO DE CONTROL PARA INYECTORES DIÉSEL

##### SOLENOIDE

Actualmente éste banco de pruebas cuenta con un common-rail system tester, con el cual sólo es posible efectuar la estrategia de inyección simple. Con el fin de ampliar las capacidades de este banco de pruebas en el trabajo de tesis de Sergio Borrero Alvarez [53], se desarrollo un circuito de control para inyectores diésel solenoide que permite efectuar tanto como estrategias de inyección simple, como estrategias de inyección múltiple, como lo son la estrategia de inyección piloto, estrategia de inyección dividida y la post-inyección. Para la realización de ensayos de tasa de inyección, será utilizado el circuito de control para inyectores diésel solenoide, antes mencionado, que controla el inyector diésel solenoide.

Para el accionamiento de la unidad electrónica es necesario que reciba la señal  $1/T$ , la cual expresa, la señal de frecuencia de inyección. Debido a a lo anterior esta señal debe ser expresada en Voltios, en un rango de -10 a 10 V [54]. Esta señal representa el inicio de la inyección, juntamente con un tiempo de retraso y la terminación de la misma, así como se muestra en la Figura 4.5.

Figura 4.5: Señal  $1/T$  y trigger.

Una vez identificada la forma de señal necesaria, fue añadido al programa del circuito eléctrico el indicador de inicio de la señal de inyección, el tiempo de retraso, el fin de la inyección, y el tiempo de retraso, esto se realizó de forma repetitiva para la realización de cada medición de tasa de inyección. La señal  $1/T$  es recibida a la unidad de control en el canal de entrada *DI 1*  $1/T$  mediante, un coaxial proveniente de la tarjeta de NI 9204. Una vez realizados los cambios, se llevó a cabo un ensayo en donde el inyector fue energizado con la finalidad de observar en un osciloscopio el comportamiento de la señal  $1/T$  con un tiempo de retraso de 1000  $\mu\text{s}$  y el pulso eléctrico generado por una pinza amperimétrica. Las señales obtenidas en el osciloscopio son consistentes con las mostradas en la Figura 4.5, por lo tanto, con esto se asegura que las señales obtenidas del circuito eléctrico tienen un correcto funcionamiento y son compatibles con la unidad electrónica.

#### 4.1.7 SOFTWARE DEL ANALIZADOR DE INYECCIÓN

Las señales adquiridas durante el proceso de inyección, son almacenadas y analizadas mediante un Software propio del tasímetro desarrollado por la empresa IAV, éste concretamente detecta la tasa de inyección expresada en  $\text{mg/ms}$ , el inicio y fin de cada inyección, la velocidad de sonido, temperatura cerca de la boquilla diésel y el pulso eléctrico.

## CAPÍTULO 5

# PUESTA EN OPERACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

---

*El presente capítulo se divide en dos secciones, la primera esta relacionada con la puesta en operación de la instalación experimental, que incluye el protocolo de encendido de la unidad de control, instalación del Software analizador de inyección, llenado de combustible del tasímetro, calibración, protocolo de inyección, e interfaz del Software analizador de inyección. Mientras que la segunda sección se centra en la validación de la instalación experimental, realizando estrategias de inyección simple y partida.*



## 5.1 PUESTA EN OPERACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

### 5.1.1 PROTOCOLO DE ENCENDIDO

En esta sección se presentan las consideraciones que se deberán tomar en cuenta, antes de encender el equipo, así como los pasos que se deberán seguir para el encendido del mismo.

- Antes de encender el sistema, por protección del mismo, es necesario medir el voltaje de los contactos, en donde será conectado. La alimentación de la unidad de control se encuentra en el rango entre 100 y 240 V. Las mediciones de voltaje se realizaron con un multímetro durante tres días consecutivos, con el fin de averiguar si existían variaciones en el voltaje, encontrando valores de voltaje de alrededor de 110 V; así mismo cada vez que se ensayaba se corroboraba la existencia de este nivel de voltaje. Por lo tanto, cumple con los requerimientos necesarios para un correcto funcionamiento.
- Se aseguró que los sensores de temperatura, señal de presión estática, codificación, así como la señal de  $1/T$  proveniente de la tarjeta NI 9402, y la señal del trigger generada por la pinza amperimétrica Fluke, estuvieran correctamente conectados al tasímetro.
- Una vez conectados correctamente los sensores, se acciona el interruptor ubicado en la parte posterior de la unidad de control, tal como se muestra en la Figura 5.1.
- Seguidamente se acciona el botón *Power* localizado en la parte frontal de la unidad de control. Este botón cuenta con un anillo led, que deberá tornarse de color azul una vez que el equipo sea encendido.



Figura 5.1: Encendido de la unidad electrónica.

Asimismo, en la parte frontal de la unidad de control se encuentran tres LEDs, el primero corresponde a la señal de  $1/T$ , el cual indica si se ha detectado una señal de inyección, el segundo, corresponde a la señal de *trigger*, el cual muestra un disparo detectado, y el último está relacionado con el *Error*, mismo que ilustra un error en general. Todos los LEDs se iluminan de color verde, cuando la señal ha sido detectada, o de color rojo cuando un error se ha presentado..

### 5.1.2 INSTALACIÓN DEL SOFTWARE ANALIZADOR DE INYECCIÓN

Los requerimientos mínimos necesarios, para el correcto funcionamiento del Software son los siguientes: 400 MB de espacio en la memoria, Dualcore 2.4 GHz, 1 GB de memoria RAM y un sistema operativo Microsoft Windows XP 32 bit, Windows 7 de 32 ó 64 bit. Una de las consideraciones a tomar en cuenta, es que en el momento de la instalación del Software no es necesaria la conexión a internet. El equipo de computo donde se desee instalar el Software, debe contar con el Software LabVIEW en la versión más reciente, y la interfaz NI Network Browser.

Los pasos a seguir para la instalación del mismo se describen a continuación:

- Se conecta el dispositivo USB que contiene el Software al equipo de computo.

- Se abre la carpeta IAV\_injection\_Analyze\_Software, la cual se muestra en la Figura 5.2.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
Declaration_of_Conformity	11/05/2018 05:12 ...	Carpeta de archivos	
IAV_Injection_Analyzer_DLL	11/05/2018 05:13 ...	Carpeta de archivos	
IAV_Injection_Analyzer_Software	11/05/2018 05:13 ...	Carpeta de archivos	
Manuals	11/05/2018 05:13 ...	Carpeta de archivos	
SoundVelocityMaps	11/05/2018 05:13 ...	Carpeta de archivos	
Certificate_EU	20/05/2015 09:11 a...	PDF Document	262 KB
Certificate_HU	20/05/2015 09:08 a...	PDF Document	597 KB
Decontamination_Declaration_1_0	13/09/2013 03:44 ...	Documento de Mi...	64 KB

Figura 5.2: Información contenida en el dispositivo USB.

- Una vez abierta la carpeta, se selecciona la opción *set up* y se ejecuta.
- Una vez seleccionada la opción *set up* aparecerá una ventana como la que se muestra en la Figura 5.3.

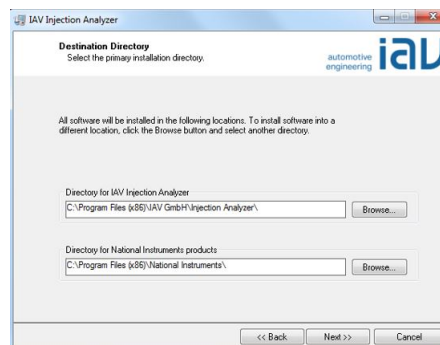


Figura 5.3: Dirección de la instalación.

- Seguidamente, aparecerá una ventana para dar inicio con la instalación del Software, se selecciona la opción *Next*.
- Mientras tanto, el software se instala automáticamente y para finalizar con la instalación se selecciona la opción *Finish*.

Una vez instalado el Software, es necesario modificar la IP del equipo de computo, donde fue instalado, dado que éste se comunica con el equipo de computo a través de la IP y un cable ethernet, el cual es conectado desde la parte posterior de la unida electrónica al equipo de cómputo. Esta conexión requiere que

el equipo de computo y la unidad electrónica estén en el mismo rango de IP. La dirección IP es **192 168 1 221** y la máscara de subred es **255 255 0 0**, mientras que para la puerta de enlace, servidor DNS preferido, y servidor DNS alternativo quedan sin valores.

Una vez instalado el Software y registrada la IP del equipo, se creo la conexión. Ahora para acceder al Software es necesario introducir un usuario y contraseña, cabe mencionar, que el Software tiene dos usuarios: *User* y *Administrator*. La diferencia entre estos dos usuarios, es que el *Administrator* habilita la barra de menú, que contiene los parámetros de operación y la configuración del mismo, mientras que *User* sólo habilita la administración del dispositivo para realizar la conexión. En la siguiente tabla se dan más detalles del usuario y contraseña. muestra el usuario y contraseña del mismo.

Tabla 5.1: Usuario y contraseñas del Software analizador de inyección.

Usuario	Contraseña
User	User
Administrator	Administrator

En el presente estudio, se utiliza el usuario *Administrator*, con la finalidad de realizar las configuraciones necesarias para cada ciclo de inyección.

- Justo después de que se accedió al Software, se selecciono la ventana *Device Admin*, para realizar la conexión entre la unidad de control al equipo de cómputo.

Para la realización de la conexión entre la unidad electrónica y el equipo de computo, se accedió al Software, y se seleccionó la ventana *Device Admin*, justo después se accedió a la ventana *Add new IP*, donde fue colocada la IP de la unidad de control, específicamente: **192 168 1 220**. Una vez ingresada la IP, posteriormente se selecciono la ventana *Connect*, y de manera automática se reconoce el tasímetro (o también llamado unidad hidráulica). Una vez creada la conexión, una marca color verde aparecerá delante de la dirección IP, indicando

que la conexión esta en correcto funcionamiento.

Al realizar correctamente la conexión se es posible acceder al Software analizador de inyección.

### 5.1.3 LLENADO DE COMBUSTIBLE

Antes de iniciar con la calibración del tasímetro, es necesario que el sistema esté completamente lleno de combustible, esto se logra inyectado combustible en el interior del tasímetro. Para ello, se emplearon las condiciones de operación descritas en el manual de la unidad electrónica [54], utilizando un inyector diésel solenoide, el cual fue energizado a través de la ECU (por sus siglas en inglés Electronic Control Unit), específicamente se han llevado a cabo los siguientes pasos:

- Antes de iniciar la inyección de combustible, el regulador del tasímetro debe estar abierto, de acuerdo con el manual [54], esto se logra dándole entre dos y tres vueltas completas. A modo de complemento, es digno de mencionar que el regulador se abre en sentido de las agujas del reloj, y se cierra en contra de las manecillas del reloj.
- Seguidamente se describen las condiciones de operación que fueron empleadas en el llenado de combustible: un nivel de  $P_{rail}$  del orden de 100 MPa, un tiempo de energización de 1 ms, y un nivel de contrapresión al interior del tasímetro de 0.1 MPa. El combustible empleado fue diésel. El llenado de combustible tardó del orden de dos horas. Cabe mencionar que durante el proceso de llenado de combustible, el sistema de inyección common-rail fue apagado por instantes de tiempo, para evitar un sobrecalentamiento en el combustible.
- La manera correcta de validar que el tasímetro ha sido llenado correctamente es mediante la salida del flujo másico a través de la línea de retorno.

### 5.1.4 CALIBRACIÓN

Después de llenar completamente el tasímetro, y dando seguimiento al manual del equipo, se realiza la calibración del mismo, con el fin de realizar mediciones de tasa de inyección. Dicha calibración consiste en ajustar las reflexiones de las ondas de presión generadas al inyectar el combustible en el interior del tasímetro, la cual se logra abriendo el regulador, para ello se gira éste de 2 a 3 vueltas completas. Se logra un ajuste óptimo cuando en la interfaz del Software se observan menos de tres reflexiones. En principio no se permite que las reflexiones se superpongan, ya que dan como resultado a mediciones erróneas. La figura 5.4 muestra un esquema del ajuste óptimo del regulador como de las reflexiones resultantes.

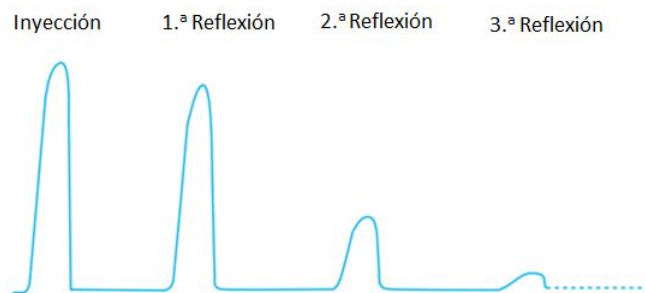


Figura 5.4: Ajuste óptimo del regulador.

Antes de iniciar con la calibración el tasímetro fue llenado por completo de combustible, y para evitar un daño en la unidad de control del tasímetro, fue revisado el voltaje en los conectores. De acuerdo con el manual [54] se llevo acabo la calibración del tasímetro, siguiendo los siguientes pasos:

- Se energizo el sistema de inyección common-rail, unidad de control y circuito eléctrico.
- Para la realización de la calibración se utilizó un inyector diésel solenoide controlado por un circuito eléctrico, el cual se describe en la sección 4.1.6 bajo la estrategia de inyección piloto.

- En relación con la  $P_{back}$ , al interior del tasímetro, se fijó un valor de 3MPa.
- Esta calibración se realizó bajo una estrategia de inyección piloto con las siguientes condiciones de operación: una duración de la inyección principal 400 us, Dwell time de 2000 us, una duración de inyección piloto de 1000 us, frecuencia de 600000, un nivel de  $P_{rail}$  de 100 MPa, y un tiempo de retraso de 1000 us.
- El Software analizador de inyección fue operado bajo el modo osciloscopio, tal como se indica en el manual.
- Se dio inicio a las inyecciones, y a la vez el regulador era ajustado, observando al mismo tiempo las reflexiones de las ondas de presión en la interfaz del Software.
- Después de realizar aproximadamente 5000 inyecciones, se logró un ajuste óptimo de las reflexiones de las ondas del tasímetro. En la Figura 5.5 a), se muestra la evolución temporal de la señal de tasa de inyección correspondiente a la inyección principal, mientras que el inciso b) representa la primera reflexión de la onda de presión, y por último el inciso c) representa la segunda reflexión de la onda de presión. Estas reflexiones de la onda de presión son consistentes con la Figura 5.4, por lo tanto se concluye que se realizó correctamente una calibración óptima de las reflexiones de las ondas de presión.

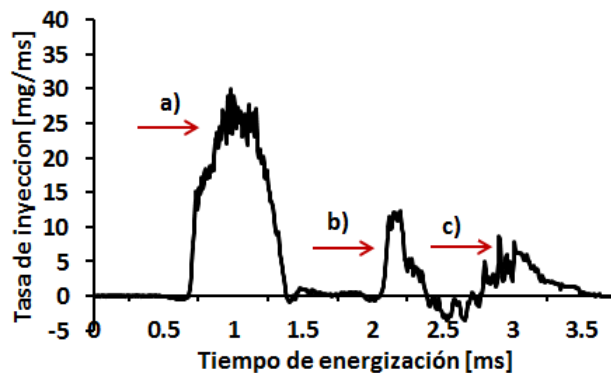


Figura 5.5: Calibración óptima del tasímetro.

Una vez calibrado correctamente el ajuste de las reflexiones de la onda de presión, se pueden realizar las medidas de tasa de inyección.

### 5.1.5 INTERFAZ DEL SOFTWARE ANALIZADOR DE INYECCIÓN

En esta sección se presenta una descripción del contenido de la interfaz del Software y de los datos que se pueden obtener de éste.

En la interfaz del Software se encuentra la barra menú, donde se ubican diferentes botones que contienen las tareas más comunes que se pueden realizar. Los botones que están activados se muestran en color blanco y los que están desactivados se muestran en color gris. A continuación se describen cada uno de los botones, incluyendo la funcionalidad de los mismos.

**Load:** Este botón tiene la función de abrir los datos de medición guardados en el formato (\*.tdms), con la finalidad de ser evaluados, cuando el tasímetro se encuentre fuera de línea.

**Save:** Este botón es un indicador de que las mediciones han sido guardadas.

**Configure:** En esta sección se desglosan los parámetros de operación que se deberán configurar para el tasímetro. A continuación se dan más detalles de cada uno de los parámetros de operación:

- *Measurement:* En este apartado se muestran los detalles geométricos del tubo, localizado en el interior del tasímetro (específicamente, la longitud del tubo es de 5 metros.), así como también el modo de operación del Software, y las unidades para la medición de temperatura y presión al interior del tasímetro.
- *Fluid:* En esta sección se configura la velocidad de sonido del combustible a utilizar. En la ventana *Mode Sound Velocity*, se muestran los diferentes modos de representar la velocidad del sonido, como puede ser el modo *map*. Mientras



que en la sección *Sound Velocity*, se tiene la opción de elegir el valor de velocidad de sonido, ya sea ingresando un valor o cargando una mapa del mismo. En el apartado de *Density* se muestra un valor fijo de este parámetro.

- *Functions*: En esta opción se seleccionan las funciones adicionales que se deseen utilizar, como son los canales auxiliares, y el control de la presión al interior del tasímetro.
- *Application*: Esta sección tiene la función de configurar el trigger y pre- trigger.
- *Storage*: Esta opción define el formato del fichero de los datos que se obtienen como resultado, y la dirección donde serán guardados. En la ventana *Save Path* se elige la dirección donde los datos serán guardados. Específicamente se desglosan los parámetros que serán guardados: *Injection Rates*, *Trigger Signal*, *Additional Channel 1*, *Cursor*, *Edge Parameters*, *Massflow*, *Injection Revision*, *Result Chart*. En la opción *Format Time Date* se muestran los formatos de datos en los que se pueden guardar los resultados: (\*.asc), (\*.dat) y (\*.tdms). La opción *Extract Strokes* tiene la función de guardar las mediciones de tasa de inyección de una o más carreras.
- *Conditioning*: Esta sección es para la activación de canales auxiliares que son mostrados en la interfaz del Software, así como para su configuración como es el nombre, unidad, y valor en el eje Y.
- *Presetting evaluation*: En esta sección se define los cálculos adicionales que se pueden realizar durante la medición de tasa de inyección, el primero corresponde al *Calculation Timedely*, el cual calcula el tiempo de retraso entre la activación del trigger en la unidad de control, y el final de la inyección, y el segundo esta relacionado con la *Duration of Control*: Esta función controla la duración del control eléctrico del inyector.
- *Device options*: Esta opción muestra el estado de la unidad de control. El apartado *Ground Mode* señala que las entradas analógicas a la unidad electrónica

deben operarse en modo *differential*. *State Mainboard*: muestra el estado actual del circuito de protección. Si el indicador se ilumina en color rojo, las salidas analógicas se han disparado, esto puede restablecerse a través del botón *Resert Failure*, una vez restablecidas el indicador debe iluminarse en color verde.

**Measure:** Todos los datos obtenidos de tasa de inyección pueden analizarse mediante esta opción. Específicamente a través de los cursores izquierdo (xl, yl) y derecho (xr, yr). Además se tiene la opción de cambiar la distancia entre (yr-yl), el área debajo de la curva, así como el máximo y mínimo (y-min, y-max).

**Manual Cursor:** Esta función define los límites de la señal de la tasa de inyección manualmente a un tiempo determinado, a través de dos pares de cursores.

**Auto restart:** En esta sección se realiza la configuración del número de mediciones de tasa de inyección a guardar. En caso de colocar valores negativos en la configuración, la medición se reinicia.

**Start:** Esta sección indica si la inyección inicia o se detiene. A lado derecho de este botón, se ubica un símbolo en forma de flecha que muestra los modos que tiene el Software para realizar las inyecciones, los cuales se describen a continuación:

- *Average:* Este modo se utiliza para medir y visualizar las tasas de inyección, presión de inyección, contrapresión al interior del tasímetro, temperatura cerca de la tobera diésel, y evoluciones temporales de las señales de tasa de inyección.
- *Continuos:* Este modo se utiliza para la medición y visualización continua de las tasas de inyección, y parámetros de inyección. En este caso después de realizar la primera inyección se realiza una medición continua, hasta que el usuario detiene manualmente las inyecciones. Los análisis estadísticos son limitados, ya que sólo puede registrar un valor máximo de 500 ciclos.
- *Calibration:* Este modo de operación resulta ser útil para realizar la calibración de fabricación. Por lo tanto, no será necesario utilizarlo.

- *Osciloscopio*: Este modo se utiliza para la realización de la calibración manual del tasímetro, donde las señales son grabadas, y se puede observar como las reflexiones de la onda presión generadas por la inyección son ajustadas.

**Analysis:** Esta sección es utilizada fuera de línea para evaluar los datos de medición registrados a través del tasímetro. Concretamente, en esta sección se pueden post-procesar las señales medidas relacionadas con el pulso eléctrico del inyector, la tasa de inyección, y la presión rail. Cabe señalar que en este momento dicha sección no se puede habilitar, dado que la versión del Software que se tiene, no permite dicha acción, para habilitar esta acción se tendría que actualizar la versión del Software.

**Online:** Permite visualizar la tendencia de una variable medida, durante el proceso de medición, sólo es posible realizar esto cuando el Software trabaja en modo promedio o calibración. En la sección *Graph* se selecciona la medida que se desea visualizar, y en la sección *Show Injection Part* se tiene la posibilidad de observar sólo una parte de la inyección.

**Reference curves:** En esta sección se pueden cargar los datos medidos de una o más inyecciones.

**Illustrator:** Esta sección permite reproducir un conjunto de mediciones de tasa de inyección, previamente guardadas, las cuales permiten reproducir la estabilidad de la inyección. Esta sección puede utilizarse sin conexión al tasímetro.

**Device admin:** Esta sección es la encargada de establecer la conexión de la unidad electrónica con el Software analizador de inyección. Los pasos a seguir para lograr esta conexión se describieron en la sección 5.1.2.

Las mediciones de tasa de inyección realizadas durante cada ciclo de inyección serán representadas en la tabla de *Results*, y las condiciones de operación serán mostradas en *Parameters Table*, las cuales se describen a continuación.

## Results

- *Begin [ms]*: Este parámetro detecta el inicio de la inyección de acuerdo al trigger recibido a la unidad electrónica.
- *End [ms]*: Este parámetro detecta el final de la inyección de acuerdo al trigger recibido a la unidad electrónica.
- *Q current [mg]*: Muestra la cantidad de combustible inyectado expresado en mg.
- *Q mean [mg]*: Este parámetro calcula el promedio del número de carreras, y este valor se muestra después de cada inyección.
- *Standar Deviation [mg]*: Calcula la desviación estándar para la cantidad de combustible, y este valor se muestra después de cada inyección.

## Parameters Table

- *Speed [rpm, crk]*: Muestra la velocidad del cigüeñal de un motor de cuatro tiempos, expresada en revoluciones por minuto.
- *Current [Stroke]*: Es el número de carreras, registrados desde el inicio de la medición hasta que ésta se detenga automáticamente.
- *Extent of Measurement*: Es el número promedio de carreras registrados desde el inicio de la medición hasta que ésta se detenga automáticamente.
- *Temperature [ $^{\circ}C$ ,  $^{\circ}F$ ]*: Temperatura cerca de la tobera diésel.
- *Pressure system [bar, psi]*: Contrapresión en el interior del tasímetro.
- *Temperature 2 [ $^{\circ}C$ ,  $^{\circ}F$ ]*: Visualización de un segundo canal de temperatura, este es un canal opcional.
- *Massflow [mg/ms]*: Muestra la cantidad de combustible inyectado, mediante el canal DI 3 MF, este es un canal opcional.

### 5.1.6 CONFIGURACIÓN PARA ESTRATEGIAS DE INYECCIÓN SIMPLE Y MÚLTIPLE.

Para la realización de los ensayos de tasa de inyección diésel propuestos en el presente estudio, y de acuerdo con la interfaz del Software analizador de inyección descrita en la sección 5.1.6 se realizaron diferentes configuraciones en la barra de menú del Software, a través de seleccionar el botón *Configure*, específicamente se establecieron los siguientes parámetros de operación:

- En la opción *Measurement*, se configuró el *Display time*, los valores de este rango son de 10 ms a 12 ms, sin embargo en el manual [54] se recomienda que se utilice un valor de 12 ms. Se seleccionó como modo de operación *Average*, ya que este modo, permite visualizar parámetros de operación como es la presión de inyección, contrapresión al interior del tasímetro, temperatura cerca de la tobera diésel y las evoluciones temporales de las señales de tasa de inyección. Las unidades del contrapresión al interior del tasímetro fueron expresadas en bar, y la temperatura en °C. Los valores de las opciones restantes se mantienen igual, esto se representa en la Figura 5.6.

Quantity display average	<input type="text" value="0"/>	[strokes]
Extent of measurement	<input type="text" value="1000"/>	[strokes]
Tube length	<input type="text" value="5"/>	[m]
Display unit quantity	<input type="text" value="mg/stroke"/>	▼
Reference axis	<input type="text" value="Time"/>	▼
Display time	<input type="text" value="12"/>	[ms]
Operation mode	<input type="text" value="Average"/>	▼
Start measure	<input type="text" value="Begin window"/>	▼
Display time oscilloscope	<input type="text" value="200"/>	[ms]
Display unit systempressure	<input type="text" value="bar"/>	▼
Display unit temperature	<input type="text" value="°C"/>	▼

Figura 5.6: Configuración de la opción *Measurement*.

- En la opción *Fluid*, se configuró la velocidad de sonido del combustible a utilizar, en la opción *Sound Velocity* se seleccionó el mapa de la velocidad de sonido correspondiente al combustible diésel, mientras que en la sección de *Density* sólo se selecciono el valor de  $830 \text{ kg/m}^3$ , lo descrito anteriormente se representa en la Figura 5.7.

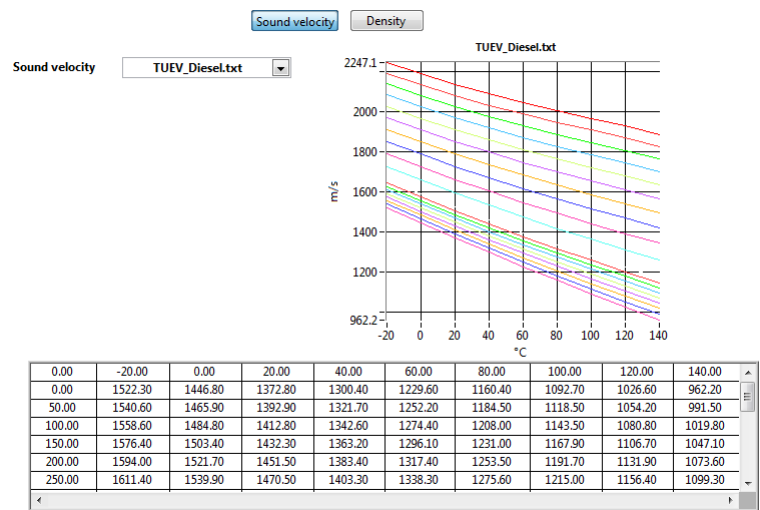


Figura 5.7: Configuración de la opción *Fluid*.

- En la opción *Function* se representan los valores opcionales descritos en la sección 5.1.6, sin embargo para la realización de este trabajo no fue necesario activarlos, dado que los datos de las mediciones de tasa de inyección fueron generadas por los sensores descritos en la sección 4.1.3, en la Figura 5.8 se muestra la configuración para el presente estudio.
- En la sección *Application* no se realizaron modificaciones, dado que los valores predeterminados en fabrica, son favorables específicamente para la realización de este estudio, por consiguiente los valores quedaron fijos, tal como se muestra en la Figura 5.9.

☒ Record additional channel 1 (AUX 1)

☐ Record additional channel 2 (AUX 2)

☐ Record additional channel 3 (AUX 3)

☐ External start

☐ External interrupt (Start/Stop)

☐ External output

Quantity to out

off

Individual Timings

off

☐ Trim

☒ Pressure control

y-gain [V/bar]

0

offset [V]

0

pressure demand [bar]

0

Figura 5.8: Configuración de la opción *Function*.

Rising triggerlevel

3

[V]

Falling triggerlevel

3

[V]

Pre-trigger time

1

[ms]

Begin injection window

-359

[°crk]

Timeout injection window

359

[°crk]

n/T signal

0

[Inc./720°]

n/T sensor

crankshaft

Upper rel. limit maximum of reflexion

120

[%]

Lower rel. limit maximum of reflexion

80

[%]

Massflow

frequency

Max. frequency massflo

0

[Hz]

Max. flow massflo

0

[mg/ms]

Figura 5.9: Configuración de la opción *Application*.

- En la sección de *Storage*, se estableció la ubicación donde los datos de tasa de inyección medidos fueron guardados. Y con el fin de obtener más detalles de las mediciones de tasa de inyección se seleccionaron los siguientes parámetros: *Injection rate*, *Trigger signal*, *Additional channel 1*, *Cursos*, *Edge parameter*, *Masflow*, *Result* y *Chart*. En relación con el fichero para la medición de los datos de tasa de inyección, se seleccionó el fichero (\*.tdms), ya que este permite la visualización de las gráficas de tasa de inyección, mediante la interfaz del Software, cuando el tasímetro se encuentra fuera de línea. La configuración para esta sección se muestra en la Figura 5.10.

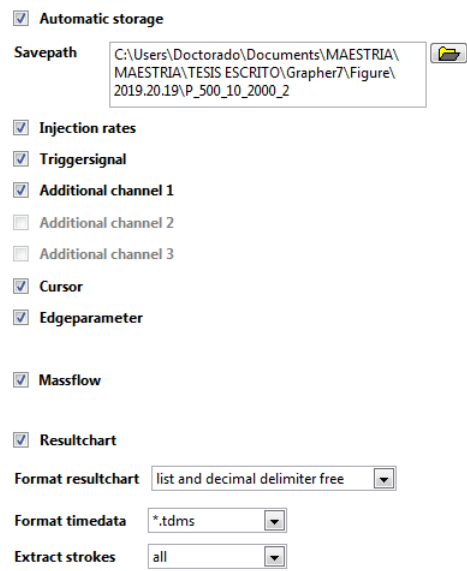


Figura 5.10: Configuración de la opción *Storage*.

- En la sección *Conditioning*, se representa el nombre, unidad y valores de los ejes de las gráficas mostradas en la interfaz del Software, estos valores son predeterminados en fabrica, los cuales resultan ser consistentes con los datos necesarios para la realización de este estudio, por consiguiente los valores quedaron fijos, tal como se muestra en la Figura 5.11.

Name triggersignal	trigger	Name additionalsignal 2	AUX2
Unit triggersignal	v	Unit additionalsignal 2	V
Y-gain triggersignal	100	Y-gain additionalsignal 2	1
Offset triggersignal	0	Offset additionalsignal 2	0
Name additionalsignal 1	AUX	Name additionalsignal 3	AUX3
Unit additionalsignal 1	bar	Unit additionalsignal 3	V
Y-gain additionalsignal 1	650	Y-gain additionalsignal 3	1
Offset additionalsignal 1	0	Offset additionalsignal 3	0

Figura 5.11: Configuración de la opción *Conditioning*.

- En la sección *Presettings evaluation* se activaron las opciones: *Calculation Timedelay*, *Duration of control*, *Calculation of curves*, *Trigger turning*, representadas en la Figura 5.12.



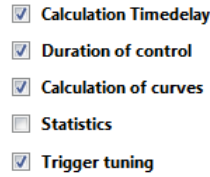


Figura 5.12: Configuración de la opción *Presetting*.

- En la sección *Device*, se verificó que el botón *Ground mode* se estableciera como *Differential*, tal como se muestra en la Figura 5.13.

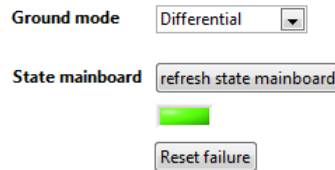


Figura 5.13: Configuración de la opción *Device*.

Una vez realizadas las configuraciones anteriores, se estableció el modo de medición *Average* a través de la flecha ubicada en la barra de menú. Seguidamente se verificó que la señal  $1/T$  y la del trigger estuvieran correctamente instaladas. Por último, se dio inicio a la medición de inyecciones, dando click al botón *Start* ubicado en la barra de menú.

Los resultados en tiempo real, por cada ciclo se muestran en la sección de *Results y Parameters Table*. Una vez realizados los ensayos de tasa de inyección, automáticamente son guardadas las mediciones en el formato seleccionado anteriormente. Juntamente se genera de forma automática un fichero (\*.dat), el cual permite la visualización de los resultados que se muestran en la Tabla 5.2.

A partir de las gráficas mostradas en la interfaz del Software, es posible extraer los datos instantáneos de la tasa de inyección y pulso eléctrico. Esto se realizó dando click derecho a cada una de estas gráficas, así se puede exportar en tres distintos

Tabla 5.2: Parámetros de la tasa de inyección.

Inicio de la inyección [ms]	Temperatura [°C, °F]
Fin de la inyección [ms]	Contrapresión [bar, psi]
Desviación [crk]	Velocidad del sonido [m/s]
Masa total inyectada [mg]	Índice de tasa máxima [mg/ms]
Velocidad [rpm]	Valor de tasa máxima [mg/ms]

formatos, el primero es Clipboard, el segundo es Excel y, por último en Imagen. Los datos de medición de tasa de inyección, para este trabajo fueron exportados en el formato Excel, debido a la compatibilidad que tiene con distintos programas generadores de gráficas.

## 5.2 VALIDACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

### 5.2.1 DISEÑO DE LA MATRIZ DE EXPERIMENTOS BAJO LA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN SIMPLE

Para lograr la validación de la instalación experimental, y siguiendo la metodología descrita anteriormente, se determinaron las condiciones de operación del sistema, concretamente fue definido el valor de presión de inyección ( $P_{rail}$ ), contrapresión en el interior del tasímetro ( $P_{back}$ ) y el tiempo de energización. Estos valores se determinaron de acuerdo con las condiciones habituales que se puede encontrar en un sistema de inyección common-rail [55].

Se fijó un nivel de  $P_{rail}$  de 100 MPa, dado que es el máximo nivel que se puede alcanzar en el sistema de inyección common-rail empleado en el presente estudio, en cuanto a la  $P_{back}$  se fijó un valor de 1 MPa, de acuerdo con las condiciones habituales que se pueden presentar al interior de un tasímetro[56, 57] y por cuestiones de seguridad, dado que el tasímetro puede resistir contrapresiones de hasta 20 MPa,

sin embargo se evita llegar a esos niveles de contrapresión, con la finalidad de evitar algún daño al equipo. En cuanto al tiempo de energización del inyector, se fijaron dos niveles de 1 ms y 1.5 ms, dado que estos valores son representativos y usados comúnmente en los sistemas de inyección common-rail [58]. La Tabla 5.3, muestra la matriz de ensayos para el estudio de la tasa de inyección bajo la estrategia de inyección simple.

Tabla 5.3: Matriz de ensayos bajo la estrategia de inyección simple.

Caso de estudio	$P_{rail}$	$P_{back}$	Tiempo de
	[MPa]	[MPa]	energización [ms]
1	100	1	1
2	100	1	1.5

### 5.2.2 TRATAMIENTO DE LOS ENSAYOS DE TASA DE INYECCIÓN BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN SIMPLE

Una vez definida la matriz de ensayos de tasa de inyección, se procedió a realizar la experimentación bajo las condiciones de operación descritas en la Tabla 5.3. Se inyectó el combustible diésel en el banco de pruebas descrito en la sección 4.1.1. El tasímetro fue presurizado con nitrógeno hasta alcanzar un nivel de 1 MPa, en función de la presión de inyección, la temperatura varía en un rango entre 30 °C y 40 °C. Durante todos los ensayos de tasa de inyección el inyector diésel solenoide fue controlado por el circuito de control descrito en la sección 4.1.6. Una vez concluida la experimentación, se procedió al análisis de los datos obtenidos mediante el Software analizador de inyección, descrito en la sección 4.1.7. Por cada inyección realizada simple, se identificaron los tiempos al inicio y final de la inyección, la masa total inyectada, y el nivel de contrapresión.

En la Figura 5.14 se representa la evolución temporal de la tasa de inyección correspondiente al caso de estudio 1, descrito en la Tabla 5.3.

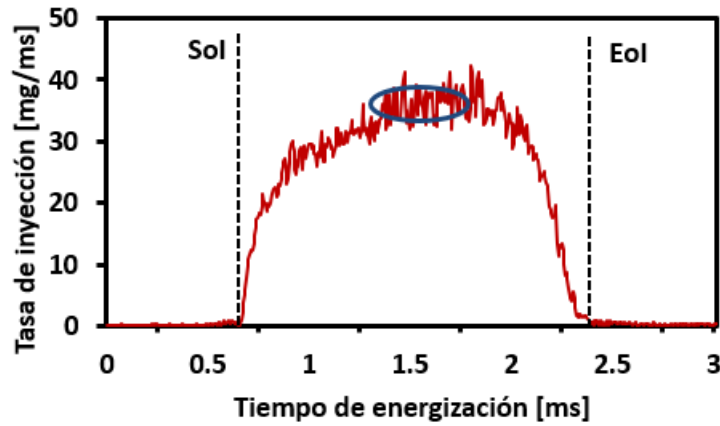


Figura 5.14: Evolución de la tasa de inyección, bajo una estrategia de inyección simple, obtenida a un tiempo de energización de 1 ms, a una  $P_{back}$  de 1 MPa, y una  $P_{rail}$  de 100 MPa.

En la Figura 5.14, se observa el inicio de la apertura del inyector diésel (SoI), así como el final de la inyección (EoI), específicamente a 0.57 y 2.43 ms, respectivamente, la masa de combustible total inyectado fue de 44.8285 mg. Se indica en color azul la zona estacionaria (ubicada entre los tiempos de 1.5 a 2 ms) que se ha seleccionado para obtener un valor medio del caudal másico, mismo que será utilizado para realizar el calculo de  $C_d$ .

Para la determinación del flujo másico estacionario se tuvieron en cuenta dos aspectos: (1) se estableció en la evolución temporal de tasa de inyección, una zona estacionaria que cubre el rango de 0.5 ms, en donde los valores de flujo másico se mantuvieron aproximadamente constantes, (2) se realizó una suma de los valores de flujo másico, seguidamente de una división entre la suma total de los valores y el lapso de tiempo establecido de 0.5 ms. El resultado obtenido se muestran en la Tabla 5.4, concretamente el valor del flujo másico estacionario determinado, así como del tiempo total de energización total del inyector diésel. Cabe señalar que el tiempo de energización de consigna es menor en comparación con el total, esto se debe las fluctuaciones generadas por la inyección.

Tabla 5.4: Parámetros de inyección para el caso 1.

Parámetro de inyección	Cantidad	Unidad
Tiempo de energización	1.77	ms
Flujo másico estacionario	35.73	mg/ms

Con la finalidad de verificar que las mediciones de tasa de inyección se realizaron correctamente en el banco de pruebas, se procedió a medir manualmente la masa de combustible inyectada, empleando una balanza gavimétrica. Tal como se muestra en la Figura 5.15, encontrando específicamente un valor de 44.12 mg. Cabe señalar que la masa total medida se encuentra dentro un rango considerable en comparación con la masa total obtenida por el Software analizador de inyección, la diferencia del 1.5 % entre las dos medidas, se debe concretamente a las difusiones que pueden ocurrir en la línea de retorno.

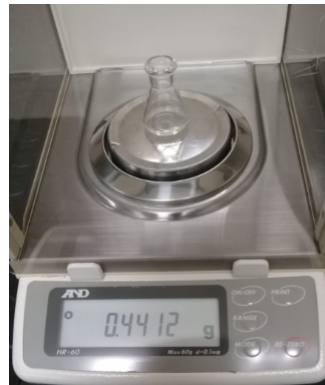


Figura 5.15: Medición manual de la masa inyectada correspondiente al caso 1.

En la Figura 5.16 se muestra la evolución temporal de la tasa de inyección correspondiente la caso de estudio 2, descrito en la Tabla 5.3.

En la Figura 5.16, se observa el inicio de la apertura del inyector diésel (SoI), así como el final de la inyección (EoI), específicamente a 0.58 y 3.4 ms, respectivamente, la masa de combustible total inyectado fue de 80.675 mg. Con la finalidad de obtener el flujo másico estacionario, el cual será utilizado para realizar el calculo de  $C_d$ , fue indicado en color azul la zona estacionaria (ubicada entre los valores de 2.5 y 3 ms)

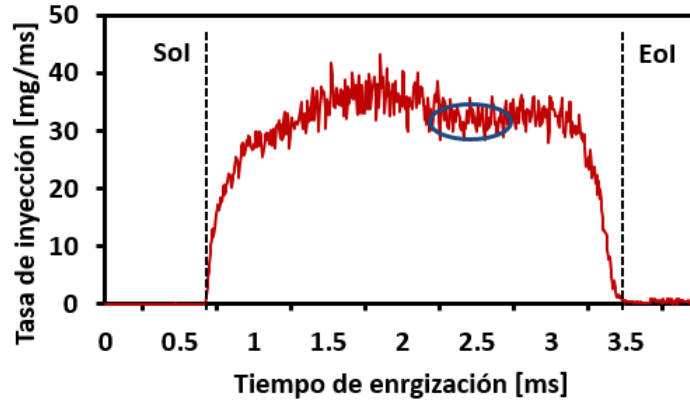


Figura 5.16: Evolución de la tasa de inyección, bajo una estrategia de inyección simple, obtenida a un tiempo de energización de 1.5 ms, a una  $P_{back}$  de 1 MPa, y una  $P_{rail}$  de 100 MPa.

que se ha seleccionado. Al igual que en el caso de estudio 1, se determinó el flujo másico estacionario, el cual se representa en la Tabla 5.4, así como, con el tiempo total de energización, cabe mencionar que al igual que el caso 1 el valor de tiempo de energización es mayor debido a las fluctuaciones presentadas en la inyección.

Tabla 5.5: Parámetros de inyección para el caso 2.

Parámetro de inyección	Cantidad	Unidad
Tiempo de energización	2.89	ms
Flujo másico estacionario	32.60	mg/ms

Las Figuras 5.14 y 5.16 muestran un comportamiento consistente con lo reportado por Ziwan Wng et al. [24] donde hace mención que una de las condiciones de operación que influyen en la entrega de combustible, es el tiempo de energización, durante este lapso la aguja del inyector permanece levantada, permitiendo el paso del combustible a través de los orificios de la tobera. Es por ello que con el tiempo de energización de 1.5 ms, el valor de flujo másico fue mayor, en comparación al obtenido a un tiempo de energización de 1 ms.

### 5.2.2.1 CALCULO DEL COEFICIENTE DE DESCARGA ( $C_d$ ), BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN SIMPLE

Uno de los parámetros característicos del flujo a través del orificio de la tobera diésel es el coeficiente de descarga ( $C_d$ ), el cual será analizado en esta sección, específicamente para el caso 1 y caso 2 bajo la estrategia de inyección simple. Para ello es necesario retomar la ecuación descrita en la sección 2.3.3. la cual se presenta enseguida:

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{teo}} = \frac{\dot{m}}{A_o} \cdot \rho_f \cdot u_{teo} \quad (5.1)$$

donde  $\dot{m}$  es el flujo másico estacionario,  $\dot{m}_{teo}$  es el flujo másico teórico,  $\rho_f$  es la densidad del combustible,  $A_o$  es el área del orificio de la tobera, y  $u_{teo}$  es la velocidad teórica a través del orificio. Si se deriva la ecuación de Bernoulli, suponiendo una velocidad despreciable, resulta la siguiente ecuación:

$$u_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta_p}{\rho_f}} \quad (5.2)$$

donde  $\Delta_p$  es la caída de presión ( $P_{rail}-P_{back}$ ).

Una vez descrita la ecuación que se empleará para determinar el  $C_d$  en los casos 1 y 2; se seguirá el siguiente procedimiento con el fin de obtener dicho parámetro característico del flujo: (1) se obtiene el flujo másico estacionario por orificio de la tobera, para ello, fue necesario retomar los valores de flujo másico estacionario de las Tabla 5.4 y 5.5, (2) este parámetro se dividió entre el número de orificios de la tobera diésel, específicamente entre 5, (3) adicionalmente, se ha estimado un valor del diámetro geométrico del orificio de la tobera diésel del orden de  $160 \mu m$ , a partir de observar el comportamiento del  $C_d$ , este valor del diámetro del orificio de la tobera estimado, se encuentra dentro del orden de magnitud que normalmente se tiene en una tobera diésel, y (4) finalmente, a partir del diámetro del orificio de la tobera

estimado, se determinó el área geométrica del orificio de la tobera diésel [59, 60, 61].

Los datos obtenidos de flujo másico estacionario por orificio, área geométrica de la tobera diésel, densidad del combustible, y velocidad de Bernoulli, fueron sustituidos en la ecuación 5.1 teniendo como resultado la obtención de los valores del  $C_d$ , específicamente para el caso 1 y 2, los cuales se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Coeficiente de descarga para el caso 1 y 2.

Caso	Coeficiente de descarga [ $C_d$ ]
Caso 1	0.87
Caso 2	0.85

En la Tabla anterior se observa el valor de  $C_d$  para los dos caso de estudio, bajo la estrategia de inyección simple. Se observa que los valores de  $C_d$  para ambos casos se encuentran dentro del mismo rango, esto se debe principalmente a la influencia que tiene la geometría del orificio de la tobera, las condiciones de operación ( $P_{rail}$  y  $P_{back}$ ), y las propiedades físicas del combustible, sobre el comportamiento del flujo interno a través del orificio de la tobera, esto es consistente con los trabajos reportados en la literatura [39, 62].

### 5.2.3 DISEÑO DE LA MATRIZ DE ENSAYOS PARA LA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PARTIDA

Para analizar el efecto de la estrategia de inyección múltiple, específicamente, la estrategia de inyección partida sobre la tasa de inyección, se han establecido las siguientes condiciones de operación, un nivel de  $P_{rail}$  como valor de 100 MPa, este es el nivel máximo que se puede alcanzar en el sistema de inyección common-rail, utilizado en el presente estudio, en cuanto al nivel de  $P_{back}$  este se fijó a 1 MPa. En cuanto a la duración del Dwell time, se estableció un valor de 1 ms, este tiempo



es representativo al utilizado en una estrategia de inyección partida en un motor Diesel. Finalmente, respecto al tiempo de energización del inyector diésel, se utilizó un tiempo de 1 ms y 4 ms, para los casos 3 y 4, respectivamente [55, 63, 64]. Las condiciones previamente descritas se sintetizan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Condiciones de operación bajo una estrategia de inyección partida.

Caso de estudio	$P_{rail}$ MPa	$P_{back}$ MPa	Primera inyección partida [ms]	Segunda inyección partida [ms]	Dwell time [ms]
3	100	1	1	1	1
4	100	1	2	2	1

#### 5.2.4 TRATAMIENTO DE LOS ENSAYOS DE TASA DE INYECCIÓN BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PARTIDA

Los ensayos de tasa de inyección bajo una estrategia de inyección partida se realizaron bajo las condiciones de operación descritas en la Sección 5.2.3, y siguiendo la metodología establecida para la estrategia de inyección simple, descrita en la Sección 5.2.2. En la Figura 5.17, se muestra la evolución temporal de la tasa de inyección bajo una estrategia de inyección partida.

En la Figura 5.17, se pueden observar los tiempos de inicio y cierre del inyector diésel, correspondientes para la primera inyección, específicamente, los tiempos al inicio y cierre del inyector diésel son: 0.55 y 2.38 ms, respectivamente. La masa total inyectada fue de 45.4940 mg. Así mismo se indica en color azul la zona estacionaria (ubicada entre los tiempos de 1.5 y 2 ms) que se ha seleccionado para obtener un valor medio del caudal másico, mismo que será utilizado para la obtención del  $C_d$ .

Asimismo en la figura, se pueden observar los tiempos al inicio y cierre del inyector diésel correspondientes a la segunda inyección, los cuales son: 2.54 y 4.42

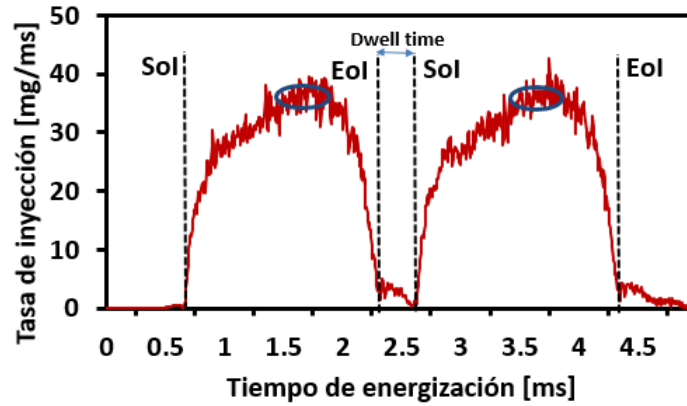


Figura 5.17: Evolución de la tasa de inyección, bajo una estrategia de inyección partida, obtenida a una  $P_{rail}$  100 MPa,  $P_{back}$  1 MPa, tiempo de energización 1 ms y Dwell time de 1 ms.

ms, respectivamente. La masa total inyectada fue de 47.4484 mg. Al igual que la primera inyección, se indica en color azul la zona estacionaria (ubicada entre los tiempos de 3.5 y 4 ms) que se ha seleccionado para obtener un valor medio del caudal másico, mismo que será utilizado para la obtención del  $C_d$ .

En la Figura 5.17, se puede observar que ambas evoluciones temporales de la tasa de inyección tienen un comportamiento muy similar, sin embargo el valor de la masa total inyectada es mayor para la segunda inyección partida, esto se debe a la interacción que existe entre la primera y la segunda inyección partida, y a la duración del Dwell time. Para este caso en específico, la aguja del inyector no ha cerrado completamente, cuando se da inicio a la segunda inyección partida, esto propicia un mayor levantamiento de la aguja del inyector, lo cual se ve reflejado en un mayor valor de flujo másico, esto es consiste con la bibliografía. [24, 65].

Teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la Sección 5.2.2, se realizó el cálculo del flujo másico estacionario para ambas inyecciones. En la Tabla 5.8, se muestran los valores de flujo másico determinados, así como los tiempos totales de energización del inyector diésel.

Tabla 5.8: Parámetros de inyección para el caso 3.

Parámetro de inyección	Primera inyección	Segunda inyección
Tiempo de energización	1.83 ms	1.88 ms
Flujo másico estacionario	35.37 mg/ms	35.52 mg/ms

#### 5.2.4.1 CALCULO DEL COEFICIENTE DE DESCARGA $C_d$ , PARA EL CASO 3, BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PARTIDA

Una vez que se obtuvo el flujo másico estacionario para la primera y segunda inyección partida del caso 3, se procedió a realizar el estudio de Coeficiente de descarga ( $C_d$ ), siguiendo la metodología descrita en la sección 5.2.2.1 En la Tabla 5.9 se muestran los valores de  $C_d$  para ambas inyecciones partidas.

Tabla 5.9: Coeficiente de descarga para el caso 3.

Caso 3	Coeficiente de descarga ( $C_d$ )
Primera inyección	0.8705
Segunda inyección	0.8744

En la Tabla 5.9, se muestran los valores de  $C_d$  para el caso de estudio 3. Se observa que los valores de  $C_d$  para ambas inyecciones partidas se encuentran dentro del rango de 0.8, esto se debe a que las condiciones de operación son valores similares, tal como es la geometría del orificio de la tobera, la  $P_{rail}$  y  $P_{rai}$ , y las propiedades físicas del combustible, ya que éstas influyen directamente sobre el comportamiento del flujo interno a través del orificio de la tobera, tal como se ha reportado en la literatura [39, 62].

En la Figura 5.17, se muestra la evolución temporal de la tasa de inyección correspondiente al caso de estudio 4, descrito en la Tabla 5.7.

En la Figura 5.17, se observa para la primera inyección partida el inicio de la apertura del inyector diésel, y el final de la inyección, específicamente a 0.59 y 2.93

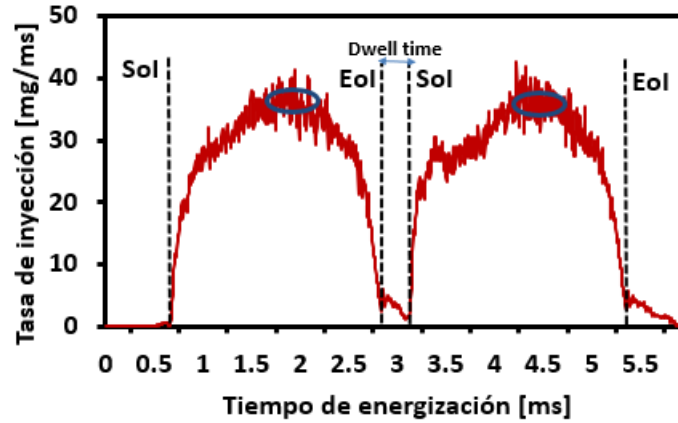


Figura 5.18: Evolución de tasa de inyección, bajo una estrategia de inyección partida, obtenida a una  $P_{rail}$  100 MPa,  $P_{back}$  1 MPa, tiempo de energización 2 ms y Dwell time de 1 ms.

ms, respectivamente. La masa total inyectada fue de 60.85 mg. Así mismo se indica en color azul la zona estacionaria (ubicada entre los tiempos de 1.5 y 2 ms) que se ha seleccionado para obtener un valor medio del caudal másico, mismo que será utilizado para la obtención del  $C_d$ .

Asimismo en la Figura 5.17, se pueden observar los tiempos al inicio y cierre del inyector diésel correspondientes a la segunda inyección, los cuales son: 3.05 y 5.45 ms, respectivamente. La masa total inyectada fue de 63.28 mg. Al igual que en la primera inyección partida se indica en color azul la zona estacionaria de masa total inyectada (ubicada entre los tiempos 4.2 y 4.7 ms) que se han seleccionado para obtener un valor medio del caudal másico, mismo que será utilizado para la obtención del  $C_d$ . Teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la Sección 5.2.2, se realizó el cálculo del flujo másico estacionario para ambas inyecciones. En la Tabla 5.10, se muestran los valores de flujo másico estacionario, así como los tiempos totales de energización.

En la Tabla 5.10 se pueden observar que los valores de flujo másico para el caso 4, en específico son mayores para las segundas inyecciones, esto también es consistente con los resultados obtenidos para el caso 3. Esto se debe a la influencia que

Tabla 5.10: Parámetros de inyección para el caso 4.

Parámetros de inyección	Primera inyección	Segunda inyección
Tiempo de energización	2.3150 ms	2.4151 ms
Flujo másico estacionario	35.64 mg/ms	35.81 mg/ms

tiene e Dwell time sobre ambas inyecciones, ya que a valores mayores de 0.8 ms, el cierre del inyector se vuelve más preciso, sin embargo la aguja del inyector no cierra completamente, lo que provoca un mayor tiempo de energización para la segunda inyección partida, reflejándose en un aumento de flujo másico, como se menciono anteriormente esto es consistente con el caso 3 y con la literatura [24, 65].

#### 5.2.4.2 CALCULO DEL COEFICIENTE DE DESCARGA $C_d$ , PARA EL CASO 4, BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PARTIDA

Una vez que se obtuvo el flujo másico para la primera y segunda inyección partida del caso 4, se procedió a realizar el calculo del  $C_d$ , siguiendo la metodología descrita en la sección 5.2.2.1. Los valores de  $C_d$ , para ambas inyecciones del caso 4 se representan en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Coeficiente de descarga para el caso 4.

Caso 3	Coeficiente de descarga ( $C_d$ )
Primera inyección	0.87
Segunda inyección	0.88

En la Tabla 5.11 se observa que los valores de  $C_d$  se encuentran en el mismo rango, al igual que en el caso 3, tal como se ha encontrado en la literatura [39, 62], esto debido al uso de condiciones de operación constantes, las cuales afectan principalmente al flujo interno a través de la tobera.

## 5.3 CONCLUSIONES

En el presente estudio se ha puesto en operación una instalación experimental para la medición de tasa de inyección diésel. Seguidamente se sintetizan las principales conclusiones alcanzadas en el presente capítulo.

- Se realizó un ajuste óptimo en las reflexiones de las ondas de presión generadas por las inyecciones al interior del tasímetro. Lo que permite realizar medidas de tasa de inyección de una forma correcta.
- Uno de los parámetros que influye en la medida de tasa de inyección bajo la estrategia de inyección simple, fue el tiempo de energización. Se observó el flujo másico del caso 2, fue mayor en comparación con el caso 1, esto se debe al incremento del lapso en donde la aguja del inyector permanece levantada.
- Con el uso de un tiempo de energización de 1 y 2 ms para la estrategias de inyección partida, se observó, que en el caso 4 se obtuvo una mayor masa total inyectada, esto debido a la influencia que tiene el tiempo de energización.
- Con el uso de estrategias de inyección partida para el caso 3 y 4, se observó que la primera inyección partida y la duración del Dwell time, influyen directamente en la segunda inyección, provocando un incremento en la masa total de combustible inyectado.
- Los valores de  $C_d$  para las estrategias de inyección simple y partida se mantuvieron dentro del mismo rango, esto debido a que los casos de estudio se realizaron bajo las mismas condiciones de operación.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

*En este capítulo se presentarán las conclusiones formuladas en base a los resultados obtenidos en el capítulo 5 “Puesta en operación y validación de la instalación experimental”, además de los trabajos propuestos para complementar el presente estudio.*

## 6.1 CONCLUSIONES

El propósito de este estudio fue el desarrollo de una metodología experimental y de análisis para la medición de tasa de inyección. Para lograr este objetivo fue necesaria la puesta en operación del tasímetro tipo N, unidad de control y Software del analizador de inyección, además del uso de herramientas teóricas descritas a lo largo de este documento. A partir de la puesta en operación del tasímetro, se realizó una validación del sistema, realizando inyecciones simples con condiciones de operación habituales en sistemas common-rail diésel. Por lo tanto, en esta sección se van a sintetizar las principales conclusiones que han sido obtenidas en la realización de este estudio.

- Unas de las condiciones de operación que afectan principalmente la medida de tasa de inyección, es el tiempo de energización. Entre mayor es el tiempo de energización los valores de flujo másico incrementan.
- Los valores de  $C_d$  bajo estrategias de inyección simple y múltiple, se mantuvieron dentro del mismo rango, esto se debe a la influencia de las condiciones de operación sobre el flujo másico a través de los orificios de la tobera.
- Con el uso de estrategias de inyección partida, la segunda inyección partida se ve afectada por la primera inyección, esto debido al movimiento de la aguja del inyector diésel.
- En los ensayos de tasa de inyección se utilizó el circuito de control para inyectores diésel con las modificaciones necesarias para obtención de la señal  $1/T$ , siendo posible reproducir resultados consistentes con la bibliografía. Este es un indicador del correcto funcionamiento de la instalación experimental.
- Las mediciones de tasa de inyección bajo estrategias de inyecciones simples y partida, son consistentes con lo reportado con la literatura, por consiguiente la instalación experimental se encuentra en condiciones óptimas de operación.



## 6.2 TRABAJOS FUTUROS

En el presente estudio se han realizado mediciones de tasa de inyección, siguiendo una metodología experimental y de análisis, mediante la puesta en operación de un tasímetro. Para complementar el presente estudio, se proponen los siguientes trabajos futuros.

- Para estudiar a profundidad el proceso de mezcla aire-combustible, este estudio puede ser ampliado analizando la influencia de la tasa de inyección sobre los parámetros macroscópicos del chorro diésel.
- Las propiedades físicas de los combustibles influyen en la obtención de la tasa de inyección. Por lo tanto, este estudio puede ser ampliado, variando las propiedades del combustible, mediante mezclas binarias de diésel-biodiésel o mezclas ternarias de diésel-biodiésel-etanol.
- Profundizar el estudio de tasa de inyección con el uso de estrategias de inyección múltiple, como son las estrategias de inyección piloto y la estrategia de post-inyección.
- Implementación de una electrónica especializada (Genotec) para la energización de inyectores tanto solenoides como piezoeléctricos, con la finalidad de realizar estrategias de inyecciones simple y múltiple.
- Dada la importancia del nivel de  $P_{rail}$  sobre la medición de la tasa de inyección, la evolución temporal de este parámetro medida por un sensor piezorresistivo, puede ser visualizada en la interfaz del software analizador de inyección.
- Con el objetivo de obtener las evoluciones temporales de los parámetros ( $P_{rail}$ ,  $P_{back}$ , tasa de inyección, y tiempo de energización) durante un determinado número de eventos de inyección y para visualizar simultáneamente las evoluciones temporales de estos parámetros, se propone la implementación de una

---

cadena de medida Yokogawa en el banco de pruebas, así como de un código propio desarrollado en el Software MATLAB, para el tratamiento de los parámetros medidos.

# REFERENCIAS

---

- [1] Nallamuthu Rajaratnam. *Turbulent jets*, volume 5. Elsevier, 1976.
- [2] Octavio Armas, Carmen Mata, and Simón Martínez-Martínez. Effect of diesel injection parameters on instantaneous fuel delivery using a solenoid-operated injector with different fuels. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (64):9–21, 2012.
- [3] Muzaffar Ali Quazi, Vikas Dhiman, et al. Development of two-stage turbo-charger system for off road application diesel engine in order to achieve 75 hp. Technical report, SAE Technical Paper, 2013.
- [4] Alexander Gorel and John Lawrence Calabrese. Low pressure egr system for diesel engines, October 16 2001. US Patent 6,301,887.
- [5] Timothy V Johnson. Diesel emission control: 2001 in review. *SAE Transactions*, pages 85–101, 2002.
- [6] By Tim Johnson. Diesel engine emissions and their control. *Platinum Metals Review*, 52(1):23–37, 2008.
- [7] N Ashgriz. Handbook of atomization and sprays. 2011. *Heidelberg, NY Springer*.
- [8] JM Riesco-Ávila, A Gallegos-Muñoz, JM Montefort-Sánchez, and S Martínez-Martínez. Procesos alternativos de combustión en motores de combustión interna. *Acta Universitaria*, 15(1):36–54, 2005.

- [9] Paolo Carlucci, Antonio Ficarella, and Domenico Laforgia. Pilot injection behavior and its effects on combustion in a common rail diesel engine. In *International Workshop on Modeling, Emissions and Control in Automotive Engines MECA*, volume 1, pages 9–10. Citeseer, 2001.
- [10] Jeffrey D Naber and Dennis L Siebers. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays. 1996.
- [11] C Soteriou, M Lambert, S Zuelch, and D Passerel. The flow characteristics of high efficiency diesel nozzles with enhanced geometry holes. In *Proc. THIESEL International Conference on Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines. Valencia, Spain*, 2006.
- [12] Wilhelm Bosch. The fuel rate indicator: a new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection. *SAE Transactions*, pages 641–662, 1967.
- [13] José María et al. Motores de combustión interna alternativos. 2011.
- [14] Oscar Alejandro de la Garza de León. *Estudio de los efectos de la cavitación en toberas de inyección diesel sobre el proceso de inyección y el de formación de hollín*, PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [15] Jaime Gimeno García. *Desarrollo y aplicación de la medida del flujo de cantidad de movimiento de un chorro diesel*, PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
- [16] Santiago A Molina. *Influencia de los parámetros de inyección y la recirculación de gases de escape sobre el proceso de combustión en un motor diesel*. Reverté, 2005.
- [17] Glenn R Bower and David E Foster. A comparison of the bosch and zudch rate of injection meters. Technical report, WISCONSIN UNIV-MADISON ENGINE RESEARCH CENTER, 1991.

- [18] A. H. Plazas. *Modelo unidimensional de inyectoros common-rail Diesel*, Tesis Doctoral, E.T.S Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2005.
- [19] CY Choi, GR Bower, and Rolf D Reitz. Effects of biodiesel blended fuels and multiple injections on di diesel engines. Technical report, SAE Technical Paper, 1997.
- [20] James P Szybist, Stephen R Kirby, and André L Boehman. No x emissions of alternative diesel fuels: a comparative analysis of biodiesel and ft diesel. *Energy & fuels*, 19(4):1484–1492, 2005.
- [21] CD Rakopoulos and DT Hountalas. A simulation analysis of a di diesel engine fuel injection system fitted with a constant pressure valve. *Energy Conversion and Management*, 37(2):135–150, 1996.
- [22] C Arcoumanis, M Gavaises, Manabu Yamanishi, and J Oiwa. Application of a fie computer model to an in-line pump-based injection system for diesel engines. Technical report, SAE Technical Paper, 1997.
- [23] Andre L Boehman, David Morris, James Szybist, and Etop Esen. The impact of the bulk modulus of diesel fuels on fuel injection timing. *Energy & Fuels*, 18(6):1877–1882, 2004.
- [24] Ziman Wang, Mirosław L Wyszynski, Hongming Xu, Nik Rosli Abdullah, and Jakub Piaszyk. Fuel injection and combustion study by the combination of mass flow rate and heat release rate with single and multiple injection strategies. *Fuel Processing Technology*, 132:118–132, 2015.
- [25] R Payri, J Gimeno, J Cuisano, and Javier Arco. Hydraulic characterization of diesel engine single-hole injectors. *Fuel*, 180:357–366, 2016.
- [26] Dong Han, Jiaqi Zhai, Yaozong Duan, Chunhai Wang, and Zhen Huang. Nozzle effects on the injection characteristics of diesel and gasoline blends on a common rail system. *Energy*, 153:223–230, 2018.

- [27] Lucio Postriotti, Carlo N Grimaldi, Michele Ceccobello, and R Di Gioia. Diesel common rail injection system behavior with different fuels. Technical report, SAE Technical Paper, 2004.
- [28] Ertan Alptekin and Mustafa Canakci. Characterization of the key fuel properties of methyl ester–diesel fuel blends. *Fuel*, 88(1):75–80, 2009.
- [29] Myung Yoon Kim, Seung Hyun Yoon, Bong Woo Ryu, and Chang Sik Lee. Combustion and emission characteristics of dme as an alternative fuel for compression ignition engines with a high pressure injection system. *Fuel*, 87(12):2779–2786, 2008.
- [30] Jeffrey D Naber and Dennis L Siebers. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays. 1996.
- [31] RD Reitz and FV Bracco. Mechanism of atomization of a liquid jet. *The physics of Fluids*, 25(10):1730–1742, 1982.
- [32] Koji Kitano, Ichiro Sakata, and Richard Clark. Effects of gtl fuel properties on di diesel combustion. Technical report, SAE Technical Paper, 2005.
- [33] José M Desantes, Raúl Payri, Antonio Garcia, and Julien Manin. Experimental study of biodiesel blends’ effects on diesel injection processes. *Energy & Fuels*, 23(6):3227–3235, 2009.
- [34] Frédéric Boudy and Patrice Seers. Impact of physical properties of biodiesel on the injection process in a common-rail direct injection system. *Energy Conversion and Management*, 50(12):2905–2912, 2009.
- [35] V Macián, V Bermúdez, R Payri, and J Gimeno. New technique for determination of internal geometry of a diesel nozzle with the use of silicone methodology. *Experimental techniques*, 27(2):39–43, 2003.
- [36] R Payri, JM Garcia, FJ Salvador, and Jaime Gimeno. Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics. *Fuel*, 84(5):551–561, 2005.

- [37] Raul Payri, FJ Salvador, Jaime Gimeno, and A Garcia. Flow regime effects over non-cavitating diesel injection nozzles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 226(1):133–144, 2012.
- [38] A Lichtarowicz, RK Duggins, and E Markland. Discharge coefficients for incompressible non-cavitating flow through long orifices. *Journal of mechanical engineering science*, 7(2):210–219, 1965.
- [39] Francisco Javier Salvador, Jaime Gimeno, Marcos Carreres, and Marco Crialesi-Esposito. Fuel temperature influence on the performance of a last generation common-rail diesel ballistic injector. part i: Experimental mass flow rate measurements and discussion. *Energy Conversion and Management*, 114:364–375, 2016.
- [40] Arthur H Lefebvre and Vincent G McDonell. *Atomization and sprays*. CRC press, 2017.
- [41] J Gimeno. Estudio de la inyección diesel mediante la medida del flujo de cantidad de movimiento del chorro. *Universidad Politécnica de Valencia, Editorial Reverté, SA*, 2011.
- [42] Yutaro Wakuri, Masaru Fujii, Tatsuo Amitani, and Reijiro Tsuneya. Studies on the penetration of fuel spray in a diesel engine. *Bulletin of JSME*, 3(9):123–130, 1960.
- [43] R Payri, FJ Salvador, J Gimeno, and LD Zapata. Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions. *Fuel*, 87(7):1165–1176, 2008.
- [44] JC Dent. A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration. *SAE Transactions*, pages 1881–1884, 1971.
- [45] V. Soare. *Phase doppler measurement in diesel dense spray: optimisation of measurements and study of the orifice geometry influence over the spray at mi-*

- croscopic level.*, Tesis Doctoral, E. T. S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2007.
- [46] Raul Payri, Lucio Araneo, Joseph Shakal, and Vlad Soare. Phase doppler measurements: system set-up optimization for characterization of a diesel nozzle. *Journal of mechanical science and technology*, 22(8):1620–1632, 2008.
  - [47] David Correas. *Estudio teórico-experimental del chorro libre diésel isoterma*, PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 1998.
  - [48] D Brian Spalding. *Combustion and mass transfer: a textbook with multiple-choice exercises for engineering students*. Elsevier, 2013.
  - [49] Stephen Busch and Paul C Miles. Parametric study of injection rates with solenoid injectors in an injection quantity and rate measuring device. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(10):101503, 2015.
  - [50] Zhiqiang Zhang, Fuquan Zhao, Jun Deng, Li-guang Li, and Yuan Shen. Characteristics of the multiple injection diesel spray employed common rail system. *Journal of Thermal Science and Technology*, 8(1):106–119, 2013.
  - [51] M Arai and K Amagai. Experimental study on a diesel spray of multi-stage injection. In *International symposium COMODIA*, volume 94, 1994.
  - [52] Ziman Wang, Haichun Ding, Mirosław L Wyszynski, Jianyi Tian, and Hongming Xu. Experimental study on diesel fuel injection characteristics under cold start conditions with single and split injection strategies. *Fuel processing technology*, 131:213–222, 2015.
  - [53] Sergio Borrego Alvarez. *Estudio de los efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla en un motor diésel.*, Tesis de maestría. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León., 2018.
  - [54] IAV. *IAV Injection Analyzer Electronic Unit*. 2018.



- [55] Robert Bosch. *Sistemas de inyección diesel por acumulador Common Rail*. Reverté, 2005.
- [56] R Payri, FJ Salvador, J Gimeno, and J De la Morena. Influence of injector technology on injection and combustion development—part 1: Hydraulic characterization. *Applied Energy*, 88(4):1068–1074, 2011.
- [57] Raul Payri, Antonio García, Vicent Domenech, Russell Durrett, and Alejandro H Plazas. An experimental study of gasoline effects on injection rate, momentum flux and spray characteristics using a common rail diesel injection system. *Fuel*, 97:390–399, 2012.
- [58] Wei Du, Juejue Lou, Yu Yan, Wenhua Bao, and Fushui Liu. Effects of injection pressure on diesel sprays in constant injection mass condition. *Applied Thermal Engineering*, 121:234–241, 2017.
- [59] Haozhong Huang, Qingxin Wang, Cheng Shi, Qingsheng Liu, and Chengzhong Zhou. Comparative study of effects of pilot injection and fuel properties on low temperature combustion in diesel engine under a medium egr rate. *Applied energy*, 179:1194–1208, 2016.
- [60] B Yu, P-F Fu, T Zhang, and HC Zhou. The influence of back pressure on the flow discharge coefficients of plain orifice nozzle. *International journal of heat and fluid flow*, 44:509–514, 2013.
- [61] E Plamondon and Patrice Seers. Development of a simplified dynamic model for a piezoelectric injector using multiple injection strategies with biodiesel/diesel-fuel blends. *Applied energy*, 131:411–424, 2014.
- [62] FJ Salvador, JJ Lopez, J De la Morena, and M Crialesi-Esposito. Experimental investigation of the effect of orifices inclination angle in multihole diesel injector nozzles. part 1—hydraulic performance. *Fuel*, 213:207–214, 2018.
- [63] Kouros Karimi. *Characterisation of multiple.injection diésel spray at elevated pressures and temperatures*.

- [64] Dong Han, Ke Li, Yaozong Duan, He Lin, and Zhen Huang. Numerical study on fuel physical effects on the split injection processes on a common rail injection system. *Energy conversion and management*, 134:47–58, 2017.
- [65] Ziman Wang, Haichun Ding, Mirosław L Wyszynski, Jianyi Tian, and Hongming Xu. Experimental study on diesel fuel injection characteristics under cold start conditions with single and split injection strategies. *Fuel processing technology*, 131:213–222, 2015.

## APÉNDICE A

# MANTENIMIENTO

---

*En el presente anexo se proporcionan los detalles para la limpieza y mantenimiento del tasímetro tipo N y de su unidad electrónica. El presente anexo se divide en dos secciones: en la primera sección se describe el objetivo del mantenimiento de los equipos antes mencionados, y en la segunda se presenta la metodología de limpieza que se deberá seguir tanto para el tasímetro como de su unidad electrónica.*

## A.1 OBJETIVO

El objetivo consiste en definir una metodología de limpieza y mantenimiento del tasimetro tipo N y de su unidad electrónica, con la finalidad de garantizar el correcto funcionamiento de dichos equipos.

## A.2 METODOLOGÍA

### A.2.1 TASIMETRO

En esta subsección se describen las medidas de limpieza y mantenimiento para el tasimetro y su unidad electrónica.

#### *Sustitución del disco de sobrepresión*

Cuando la presión al interior del tasimetro es mayor a la permisible (es decir 200 bar), un disco de ruptura de sobrepresión se activa. En caso de que esto ocurra se procede a realizar el siguiente procedimiento:

- Despresurizar, de forma lenta totalmente el tasimetro.
- Desenroscar el disco de ruptura girándolo hacia la izquierda.
- Reemplazar el anillo del sello de aluminio G 1/8, y el disco de ruptura.
- Lubricar la rosca del disco de reemplazo con pasta antiadherente.
- Apretar el disco en sentido de las manecillas del reloj, concretamente a este se le tiene que dar un par de apriete de **20 Nm**.
- Finalmente el tasimetro esta listo para ser presurizado.

## A.2.2 UNIDAD ELECTRÓNICA

### *Limpieza del filtro*

Para garantizar la funcionalidad del filtro del ventilador ubicado en la parte frontal de la unidad electrónica, se debe de cambiar o limpiar dependiendo del grado de contaminación. Si se descuida el mantenimiento del filtro, la unidad electrónica puede ser dañada.

Para retirar el filtro de la unidad electrónica es necesario un destornillador de punta plana con un ancho de 5 mm, para así abrir la cubierta del filtro.

- Colocar con cuidado la punta del destornillador en en la parte inferior de la cubierta del filtro.
- Levantar la tapa.

Se cuentan con dos opciones para limpiar el filtro, las cuales se describen a continuación:

- La limpieza se puede realizar con aire, utilizando un compresor.
- La limpieza también se puede realizar mediante agua limpia o agua destilada. Antes de volver a colocar el filtro, asegúrese de que esté completamente seco y que no tenga daños visibles.
- Colocar el filtro en su posición original y empujar la cubierta del filtro en su lugar.

Cabe mencionar que la unidad electrónica debe recibir una calibración anual.